

Физико-географические исследования

УДК 551.577.21(470.53)(045)

Н.А. Калинин, Б.А. Сивков, А.В. Дмитриев

УСЛОВИЯ ФОРМИРОВАНИЯ ЛИВНЕВЫХ ОСАДКОВ ТЕПЛОГО ПЕРИОДА В ПЕРМСКОМ КРАЕ

Рассматривается вопрос об условиях формирования и возможности прогноза ливневых осадков на территории Пермского края с помощью индексов неустойчивости атмосферы. В ходе исследования была проведена оценка пространственно-временного распределения случаев ливневых осадков, а также определение наиболее благоприятных значений метеопараметров и синоптических ситуаций, способствующих выпадению ливней. Расчеты индексов неустойчивости проводились на основе данных реанализа ERA-Interim спектральной модели Европейского центра среднесрочных прогнозов погоды (ECMWF) и реанализа американской гидродинамической модели Climate Forecast System (CFS). На основе корреляционного анализа была проведена оценка зависимости индексов неустойчивости от количества и средней интенсивности ливневых осадков. Определены и скорректированы критические значения рассматриваемых индексов неустойчивости применительно к исследуемой территории. Исследование показало, что чаще всего ливневые осадки наблюдаются в июне и в июле во вторую половину дня и вечером. Было установлено, что ливневые осадки преимущественно связаны с прохождением холодных фронтов. Оценка качества индексов неустойчивости показала целесообразность их использования для прогноза и диагноза ливневых осадков, в том числе в градации опасного явления.

Ключевые слова: ливневые осадки, сильные ливни, очень сильные дожди, Пермский край, реанализ, индексы неустойчивости, прогноз.

DOI: 10.35634/2412-9518-2020-30-3-295-306

Возникновение конвекции – результат неустойчивости атмосферы, которая способна приводить к развитию неблагоприятных природных явлений (НЯ) и опасных природных явлений (ОЯ), например, гроз, града, ливней и т. д. Все ОЯ, как известно, по интенсивности развития, продолжительности или моменту возникновения могут представлять угрозу жизни или здоровью людей, а также способны наносить значительный материальный ущерб [1; 2]. Более интенсивные и продолжительные ливневые осадки способны увеличивать уровень воды в реках, в результате чего происходит затопление домов и урожая, также сильные ливни парализуют движение автомобильного и железнодорожного транспорта, оказывают негативное влияние на сельское хозяйство и работу жилищно-коммунальных служб.

Согласно [3], только по России ежегодный ущерб от НЯ и ОЯ составляет не менее 30–60 млрд руб. Так, например, из-за сильных ливневых осадков произошли наводнения в конце мая 2015 г. в Алтайском крае, в результате чего ущерб составил примерно 6,5 млрд руб [4]. Поэтому очень важно вовремя спрогнозировать ОЯ (их интенсивность и количество), чтобы избежать не только материального ущерба, но и человеческих жертв.

Ливни относятся к критерию НЯ, когда количество выпавших осадков достигает 15 мм и более за период ≤ 1 ч, но менее критерия ОЯ. При достижении 30 мм и более в период ≤ 1 ч ливень переходит в разряд ОЯ, называемый «сильным ливнем» [1].

Цель работы – выявление условий формирования ливневых осадков (разной интенсивности) теплого периода на территории Пермского края для повышения качества их диагноза и прогноза.

Материалы и методы исследований

Исследование проводилось на примере территории Пермского края, где находятся метеостанции Вая, Чердынь, Бисер, Пермь, Кын и Кунгур, на которых устанавливаются плювиографы, данные которых необходимы для исследования. К метеостанциям, которые расположены в ливнеопасных районах, относятся следующие станции: Вая, Бисер, Кын и Кунгур¹.

¹Об утверждении и вводе в действие Перечня и критерии опасных гидрометеорологических явлений (ОЯ) по территории деятельности ФГБУ «Уральское УГМС»: приказ № П-01-2015/35-3 от 9 апреля 2015 г.

Источниками данных о случаях с ливневыми осадками, которые наблюдались с мая по сентябрь в период 2011–2019 г. в Пермском крае, послужили метеорологические ежемесячники и таблицы метеорологических наблюдений (ТМС), предоставленные Пермским ЦГМС.

На первом этапе работы были рассмотрены пространственно-временные особенности распределения случаев с ливневыми осадками, а затем (второй этап), используя данные ТМС, проанализировано преобладание тех или иных значений метеорологических характеристик (температуры воздуха, температуры точки росы, относительной влажности, атмосферного давления, направления и скорости ветра у земли), при которых наблюдались ливни.

На третьем этапе оценивалась повторяемость синоптических ситуаций (барические образования и фронты), при которых наблюдались ливневые осадки. Для описания краткой синоптической ситуации были использованы синоптические карты погоды, предоставленные Пермским ЦГМС, а также архив синоптических бюллетеней, предоставленный Гидрометцентром России.

Четвертый этап данной работы посвящен расчету индексов неустойчивости атмосферы. Для всех случаев ливневых осадков по формулам (1) – (5) рассчитывались индексы, основанные на температурно-влажностных характеристиках – 3D, VT, CT, TT и K (индекс Вайтинга) на основе реанализа спектральной модели Европейского центра среднесрочных прогнозов погоды (ECMWF)ERA-Interim. Временной шаг составил 6 ч, а пространственное разрешение 0,5°. Использовались следующие исходные данные реанализа ERA-Interim: температура воздуха у поверхности земли и на изобарических поверхностях 850, 700 и 500 гПа, а также температура точки росы у земли и на уровнях 850 и 700 гПа. Для сильных ливней, включая очень сильные дожди, были рассчитаны индексы неустойчивости, основанные на методе частиц (CAPE, UVV, CIN и LI) по формулам (6) – (8), на основе данных реанализа американской модели CFS. Временное и пространственное разрешение аналогично реанализу ERA-Interim. Файлы GRIB-2, в которых находятся данные реанализа CFS, открывались программой OpenGrADS 2.2. В этой программе расчет индексов неустойчивости происходит автоматически через математический аппарат. Анализировались значения индексов CAPE, CIN и LI, рассчитанные от земной поверхности до уровня тропопаузы.

Определение степени неустойчивости атмосферы и мощности конвективно-неустойчивого слоя по данным аэрологического зондирования – основа многих существующих методов прогноза явления конвективного происхождения. Опасные явления погоды (ливни, град, грозы, шквалы и др.) тем интенсивнее, чем большую имеют мощность конвективные ячейки по вертикали вверх.

Ниже будет представлено краткое описание каждого индекса неустойчивости, значения многих из которых применяются в негидростатических мезомасштабных моделях для прогноза конвективных явлений.

Для расчета *индекса 3D* необходимо применять формулу:

$$3D = T_d - (T - T_d), \quad (1)$$

где T – температура воздуха, °C; T_d – температура точки росы, °C; $T - T_d$ – дефицит точки росы, °C.

Индекс VT (Vertical Totals Index) описывает вертикальный градиент температуры в конкретном столбе воздуха и записывается как:

$$VT = T_{850} - T_{500}, \quad (2)$$

где T_{850} – температура воздуха на изобарической поверхности 850 гПа, °C; T_{500} – температура воздуха на 500 гПа, °C [5–7].

Индекс CT (Cross Totals Index) основывается на расчете количества влаги в более низких уровнях атмосферы. Формула для его нахождения выглядит следующим образом:

$$CT = T_{d850} - T_{500}, \quad (3)$$

где T_{d850} – температура точки росы на изобарической поверхности 850 гПа, °C; T_{500} – температура воздуха на 500 гПа, °C [5–7].

Индекс TT (Total Totals Index) – это комплексный индекс, складывающийся из VT и CT. Формула для его расчета выглядит так:

$$TT = (T_{850} - T_{500}) + (T_{d850} - T_{500}). \quad (4)$$

Расчет *индекса Вайтинга* (KIndex) основан на вертикальном градиенте температуры, влажности воздуха в нижней тропосфере, а также учитывает вертикальную протяженность влажного слоя воздуха [7; 8]:

$$K = T_{850} - T_{500} + T_{d850} - DD_{700}, \quad (5)$$

где T_{850} и T_{500} – температура воздуха на изобарических поверхностях 850 и 500 гПа соответственно, °C; T_{d850} – температура точки росы на изобарической поверхности 850 гПа, °C; DD_{700} – дефицит точки росы на изобарической поверхности 700 гПа, °C. При значениях индекса 40 °C и более стоит ожидать развития конвективных ОЯ.

Индекс плавучести (Lifted Index, LI) [9–11] является одним из основных критериев статической устойчивости атмосферы и определяется как разность между виртуальной температурой изобарической поверхности 500 гПа и температурой частицы воздуха единичного объема, поднявшейся в этот слой:

$$LI = T'_{500} - T'_{p,500}, \quad (6)$$

где T'_{500} – виртуальная температура на изобарической поверхности 500 гПа, °C; $T'_{p,500}$ – виртуальная температура поднявшейся частицы воздуха, °C.

Величины индекса LI меньше –9 °C являются признаком крайней неустойчивости атмосферы, в интервале от –9 до –6 °C характеризуют атмосферу как сильно неустойчивую, в интервале от –6 до –3 °C – как неустойчивую, от –3 до 0 °C – слабо неустойчивую.

Потенциальная доступная энергия неустойчивости (Convective Available Potential Energy, CAPE) [9–11] представляет собой работу, которую потенциально может совершить частица воздуха при адиабатическом подъеме. При значениях CAPE, равных 1000–2500 Дж/кг и более, стоит ожидать развития опасных конвективных явлений. CAPE рассчитывается по формуле:

$$CAPE = g \int_{LFC}^{EL} \frac{T'_p - T'}{T'} dz, \quad (7)$$

где g – ускорение свободного падения, m/c^2 ; T'_p и T' – виртуальная температура окружающей среды и частицы воздуха соответственно, °C; LFC – уровень свободной конвекции, гПа; EL – уровень выравнивания температуры, гПа.

Индекс UVV характеризует скорость восходящих потоков (m/c), которую можно приблизительно оценить по формуле [9; 10; 12]:

$$UVV = \sqrt{2CAPE}.$$

Энергию противодействия конвекции (Convective Inhibition, CIN) можно вычислить по формуле:

$$CIN = g \int_0^{LFC} \frac{T'_p - T'}{T'} dz, \quad (8)$$

где g – ускорение свободного падения, m/c^2 ; T'_p и T' – виртуальная температура окружающей среды и частицы воздуха соответственно, °C; LFC – уровень свободной конвекции, гПа.

Энергия противодействия конвекции записывается отрицательным числом. Значения $CIN < -200$ Дж/кг достаточно для прекращения конвекции в атмосфере (сильная устойчивость), при значениях от –200 до –50 Дж/кг – умеренная устойчивость, а –50 –0 Дж/кг – слабая устойчивость, при которой возможна конвекция.

В завершении четвертого этапа был применен метод статистического анализа значений индексов неустойчивости. По результатам полученных величин индексов 3D, VT, CT, TT и K были установлены пороговые значения для всех случаев ливневых осадков (без учета их интенсивности). Далее была произведена попытка уточнения критических значений для индексов CAPE, UVV, CIN и LI для случаев с сильными ливнями (включая очень сильные дожди), а также для случаев, когда эти ОЯ не наблюдались.

Все индексы неустойчивости рассчитывались в момент/срок (ближайший), предшествующий началу ливневых осадков и во время непосредственно самого явления.

Результаты и их обсуждение

Для установления и уточнения критических значений для всех рассматриваемых индексов неустойчивости применялся статистический анализ, который позволил получить зависимость между значениями индекса и количеством выпавших ливневых осадков и их интенсивностью через коэффициент корреляции (k). Далее непосредственно производилась работа над, либо уточнением тех или иных индексов неустойчивости, либо установлением новых критических значений (интервал или одно определенное значение). Для оценки целесообразности применения индексов по модели CFS для прогноза ливневых осадков рассчитывались характеристики оправдываемости прогноза: общая оправдываемость ливней ($P_{общ.}$), оправдываемость наличия и отсутствия ливней (P_n и P_o соответственно), предупрежденность наличия и отсутствия ливней (P_n и P_o соответственно), критерий Пирса-Обухова (T). С формулами расчета данных параметров можно ознакомиться в [13].

В период с мая по сентябрь 2011–2019 г. по данным плювиографических наблюдений рассматриваемых метеостанций Пермского края было зафиксировано 668 случаев с ливневыми осадками. Из них 18 случаев приходится на ливни критерия НЯ, 7 случаев сильного ливня и 6 случаев очень сильного дождя, а остальные случаи относятся к умеренным и слабым ливням, которые не достигли ни одного из критериев, но также определяют практическую значимость.

Стоит отметить, что ввиду отсутствия в некоторых месяцах на одной или нескольких метеостанциях данных плювиографа, пространственно-временные изменения повторяемости ливневых осадков могут отличаться от реальности. Поэтому стоит оценивать полученные результаты как примерные, насколько это возможно (при используемых материалах с данными) приближенными к реальности.

Была выявлена средняя многолетняя интенсивность ливневых осадков, которая составила 0,67 мм/мин, а для очень сильного дождя – 0,15 мм/мин. За рассматриваемый период в Пермском крае наибольшее число ливней приходится на 2012 г. (132 случая), чуть меньше (103 случая) было в 2011 г. Наименьшая повторяемость ливней приходится на 2018 и 2019 г., но это связано с наличием данных плювиографа только у станций Вая и Чердынь. В целом рис. 1 показывает тенденцию к понижению числа случаев по годам.

Также было отмечено общее преобладание июня и июля по повторяемости случаев ливневых осадков в год по сравнению с другими месяцами. Исключением считается 2014 и 2019 г., когда в августе было зафиксировано больше случаев ливней, чем в остальных месяцах. Наибольшее число случаев приходится на июль 2012 г., чуть меньше (46) – на июнь 2017 г.

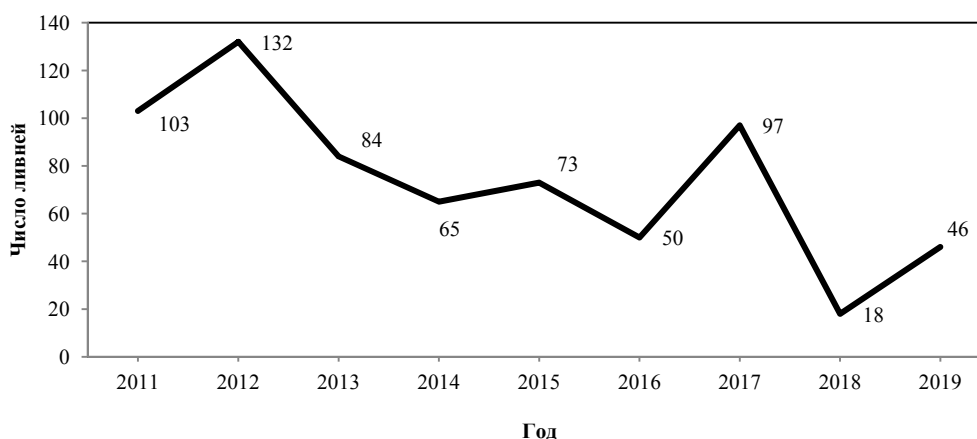


Рис. 1. Число случаев ливневых осадков в Пермском крае с мая по сентябрь за 2011-2019 г.

При рассмотрении повторяемости случаев с ливнями в зависимости от времени суток было выявлено, что наибольшая повторяемость числа случаев ливневых осадков приходится на вторую половину дня и вечер, 26 и 28 % от общего числа соответственно. Большая повторяемость наблюдается и во второй половине ночи (11 %). В первой половине дня осадки ливневого характера выпадают значительно реже – 8 % от общего количества ливневых осадков.

Практический интерес для прогноза ливней представляет повторяемость числа случаев ливней в зависимости от метеорологических характеристик:

1. При **температуре воздуха** у земли (T) в пределах от 15 до 20 °С включительно повторяемость ливневых осадков наибольшая, она составляет 39 % (260 случаев). Чуть меньше ливней наблюдается при значениях T от 10 до 15 °С, повторяемость равна 35 % (232 случая). При значениях T от 0 до 5 °С, а также выше 30 °С, повторяемость ливневых осадков составляет 1 % (4 и 6 случаев, соответственно) от общего числа случаев.

2. Чуть больше половины (52 %) от общего числа случаев ливневых осадков приходится на значения **температуры точки росы** у земли (T_d) от 10 до 15 °С включительно. Довольно большую повторяемость показали значения T_d от 15 до 20 °С включительно, она составила 30 % от общего числа случаев. При значениях T_d ниже 0 °С ливневые осадки не выпадали.

3. Больше половины (62 %) от общего числа случаев приходится на значения **относительной влажности** (ϕ) от 81 до 100 % включительно. При значениях ϕ от 20 до 40 % повторяемость составляет 1 %.

4. При значениях **атмосферного давления** (P) от 1000,1 до 1010 гПа повторяемость составляет 54 %, а при значениях от 1010,1 до 1020 гПа – 30 %. При значениях P от 980 до 990 гПа, а также от 990,1 до 1000 гПа повторяемость минимальная и составляет всего 2 % от общего числа случаев.

5. Наибольшее число случаев ливневых осадков приходится на северо-западное–северное **направление ветра**, повторяемость составляет 20 %, при юго-западном–южном направлении ветра повторяемость равна 22 %, такая же повторяемость приходится и на юго-восточное–восточное направления ветра.

6. Большинство случаев (48 % от общего числа) ливневых осадков приходится на **скорость ветра** у земли (V), равной 2 - 3 м/с. Почти одинаковое количество случаев, 20 и 28 %, относятся к V в пределах 4 - 5 и 0 - 1 м/с соответственно. Не так часто ливневые осадки сопровождаются V , составляющей 6 м/с и выше.

Рассмотрение синоптических особенностей при ливневых осадках привело к следующим результатам:

1. Около 40 % (265 случаев) всех случаев ливневых осадков являются внутримассовыми, а 60 % (403 случая) – фронтальными. Внутримассовые ливни чаще всего выпадают при следующих синоптических ситуациях: ложбина циклона – 19 % (от общего числа внутримассовых ливней), теплый сектор циклона (частного циклона) – 16 %, частный циклон и тыловая часть циклона – 10 %.

2. Очень сильные дожди (6 случаев) в Пермском крае за 2011–2019 г. (май–сентябрь) имеют внутримассовое происхождение.

3. Из 403 случаев фронтальных ливневых осадков холодным фронтом вызвано 45 % случаев, теплым фронтом – 34 %, фронтом окклюзии – 14 %, а вторичным холодным фронтом – 7 %.

4. Все 7 случаев сильных ливней имеют чаще всего фронтальное происхождение, только 1 случай из 7 имеет внутримассовый характер.

5. Выпадению ливневых осадков чаще всего способствует циклоническая деятельность атмосферы, а если имеет место антициклональная деятельность, то, как правило, это восточная периферия антициклона.

Расчетные значения индексов неустойчивости по данным реанализа ERA-Interim до и во время ливневых осадков позволили разработать критические значения для предикторов ($3D$, VT , CT , TT и K). Стоит отметить, что корреляционная связь между этими индексами и количеством выпавших ливневых осадков и их интенсивностью является незначительной. Это связано с тем, что не учитывались при этом анализе случаи «без осадков», а температурно-влажностные характеристики для всех ливневых осадков (разной интенсивности) в целом отмечались одинаковые.

Значения индекса $3D$, характеризующего состояние атмосферы до начала ливней, изменяются в довольно широком диапазоне: от –13 до 19 °С. Согласно рис. 2. *а*, около 49 % ливневых осадков выпадают при значениях индекса $3D$, равных 10 - 14 °С, примерно вдвое меньше (22 %) доля случаев ливневых осадков приходится на значения $3D$ в пределах 5–9 °С, а при 15–19 °С – 12 %. Как можно заметить, при значениях данного индекса, равных 19 °С и выше, случаев ливневых осадков не было зафиксировано. Также было выяснено, что среднее значение индекса $3D$ для сильных ливней и очень сильных дождей составило 14 °С.

Значения индекса $3D$, характеризующего состояние атмосферы во время ливней, изменяются в диапазоне: от –14 до 19 °С. Как видно на рис. 2. *б*, общая картина распределения случаев ливней в зависимости от значений $3D$ сохранилась, за исключением того, что в пределах 15–19 °С число слу-

чаев ливней увеличилось и теперь составляет 20 %. Это связано с тем, что влажность во время ливневого дождя увеличивается. При значениях индекса 3D в пределах 10–14 °С доля ливневых осадков составляет 50 %, а при 5–9 °С – снизилась до 17 %. Среднее значение индекса 3D для сильных ливней и очень сильных дождей составило 15 °С.

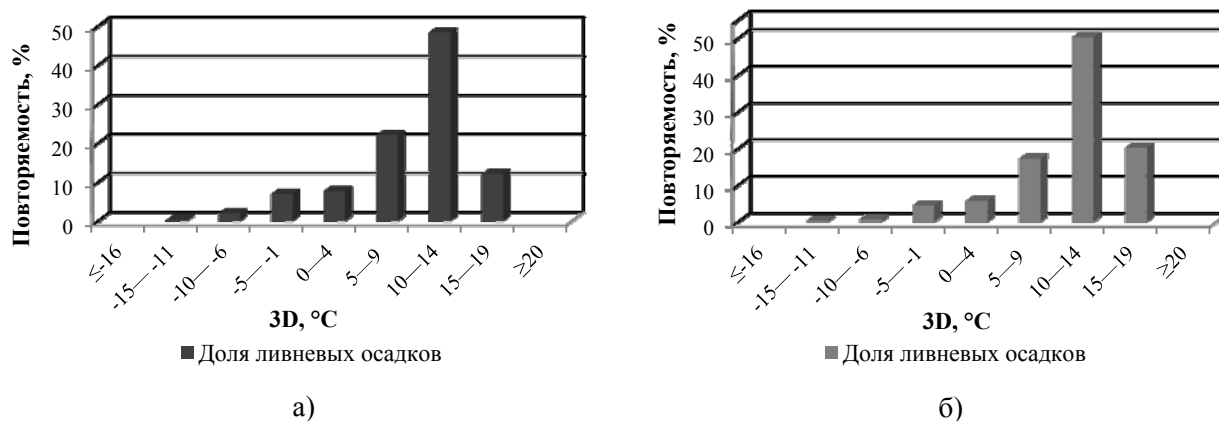


Рис. 2. Процентное распределение числа случаев ливней в зависимости от значений индекса 3D: а) до начала ливней; б) во время ливней

Диапазон изменения значений индекса VT, характеризующего состояние атмосферы до начала ливней, составляет 16–32 °С. На рис. 3. а видно, что основная доля случаев ливневых осадков приходится на значения индекса VT в пределах 20–24 °С (повторяемость 40 %) и 25–29 °С (повторяемость 58 %). При значениях VT от 19 °С и меньше, а также 30 °С и выше – случаи ливней были единичные (повторяемость незначительная). Осредненное значение индекса VT для сильных ливней и очень сильных дождей равно 25 °С.

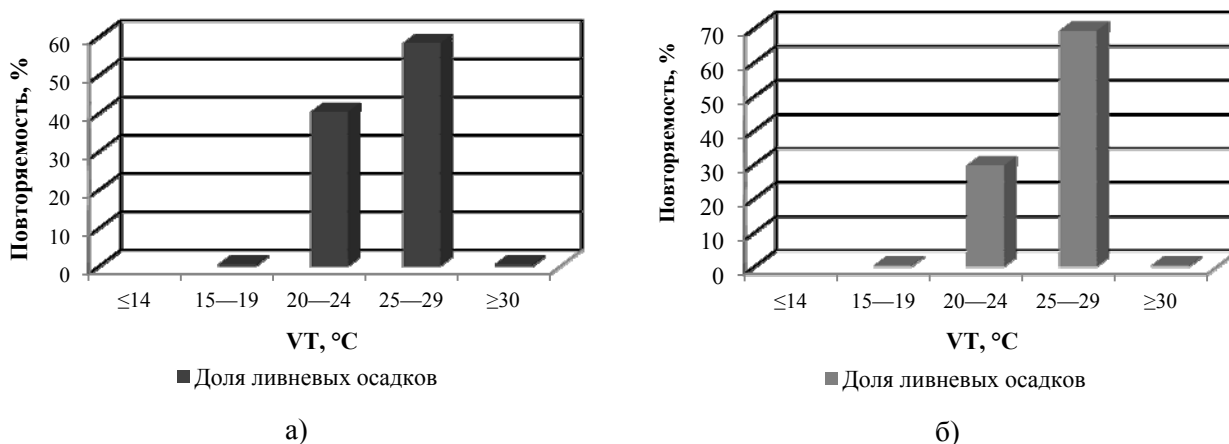


Рис. 3. Процентное распределение числа случаев ливней в зависимости от значений индекса VT: а) до начала ливней; б) во время ливней

Значения индекса VT, характеризующего состояние атмосферы во время ливней, изменяются в диапазоне: от 16 до 30 °С. В целом, согласно рис. 3. б, доля случаев ливней не сильно изменилась в зависимости от значений VT. Но стоит отметить, что при значениях 25–29 °С повторяемость ливневых осадков увеличилась, теперь она составляет 69 %, а при значениях 20–24 °С – 30 %. Осредненное значение индекса VT для сильных ливней равно 26 °С, а для очень сильных дождей – 25 °С.

Максимальное значение индекса СТ, вычисленного до начала ливней, равно 27 °С, минимальное значение равно 14 °С. Наибольшая повторяемость ливней (83 %), согласно рис. 4. а, приходится на значения индекса СТ в пределах 20–24 °С. Среднее значение индекса СТ для сильных ливней и очень сильных дождей составило 22 °С.

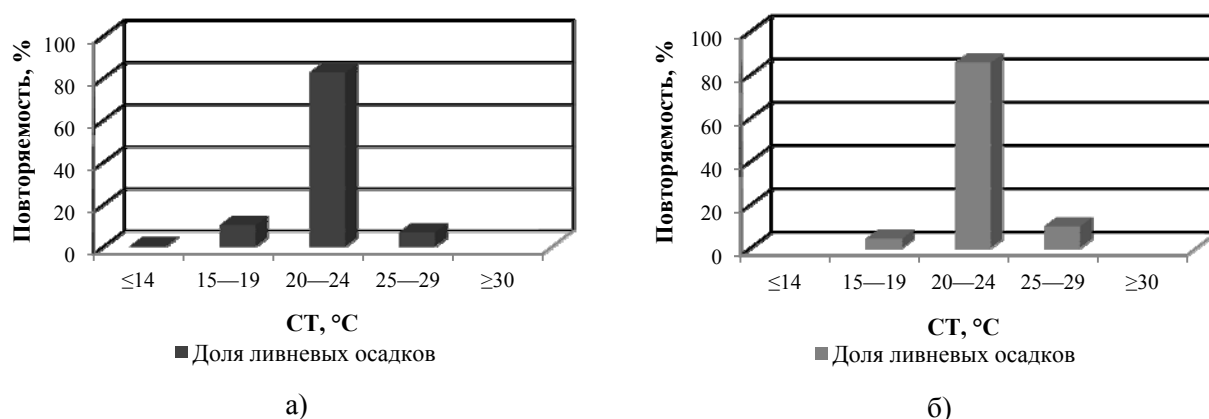


Рис. 4. Процентное распределение числа случаев ливней в зависимости от значений индекса СТ: а) до начала ливней; б) во время ливней

Максимальное значение индекса СТ, вычисленного во время ливней, равно 27 °С, минимальное значение равно 15 °С. Согласно рис. 4. б, наибольшая повторяемость ливней (86 %) также приходится на значения СТ, равные 20–24 °С. Среднее значение индекса СТ для сильных ливней и очень сильных дождей составило 23 °С.

Значения индекса ТТ, характеризующего состояние атмосферы до начала ливней, изменяются в диапазоне: от 30 до 57 °С. Согласно рис. 5. а, очевидное преобладание числа случаев ливневых осадков (повторяемость составила 56 %) приходится на значения индекса ТТ в пределах 45–49 °С, при значениях 40–44 °С повторяемость ливней для этого индекса равна 22 %, а при 50–54 °С – 19 %. При значениях ТТ = 29 °С и менее ливневые осадки не выпадают. Среднее значение индекса ТТ для сильных ливней и очень сильных дождей составило 47 °С.

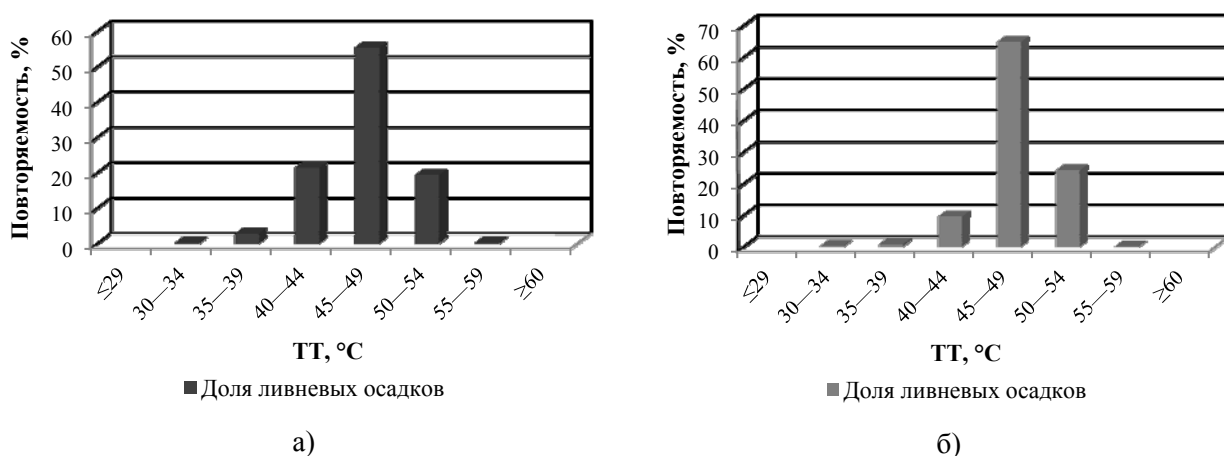


Рис. 5. Процентное распределение числа случаев ливней в зависимости от значений индекса ТТ: а) до начала ливней; б) во время ливней

Значения индекса VT, характеризующего состояние атмосферы во время ливней, изменяются в таком же диапазоне, как и до начала явления. Похожая картина (см. рис. 5. б) наблюдается и в распределении числа случаев ливней по градациям значений ТТ. При значениях индекса ТТ в пределах 45–49 °С – повторяемость ливней составляет 65 %; при значениях ТТ в пределах 50–54 °С – 24 %; при значениях ТТ в пределах 40–44 °С – 10 %. Когда значения индекса ТТ = 29 °С или менее, тогда выпадение ливневых осадков из-за недостаточной неустойчивости атмосферы невозможно. Среднее значение индекса ТТ для сильных ливней составило 48 °С, а для очень сильных дождей – 47 °С.

Максимальное значение индекса К, вычисленного до начала ливней, равно 38 °С, минимальное значение равно –9 °С. Согласно рис. 6. а, ливневые осадки выпадали и при отрицательных значениях индекса К, но очень мало. Большинство случаев ливневых дождей все-таки выпадали при положи-

тельных значениях параметра К: при значениях 20–24 °С повторяемость ливней составила около 15 %; при значениях 25–29 °С – 44 %; а при значениях 30–34 °С – 34 %. Осредненное значение индекса К для сильных ливней и очень сильных дождей равно 29 °С.

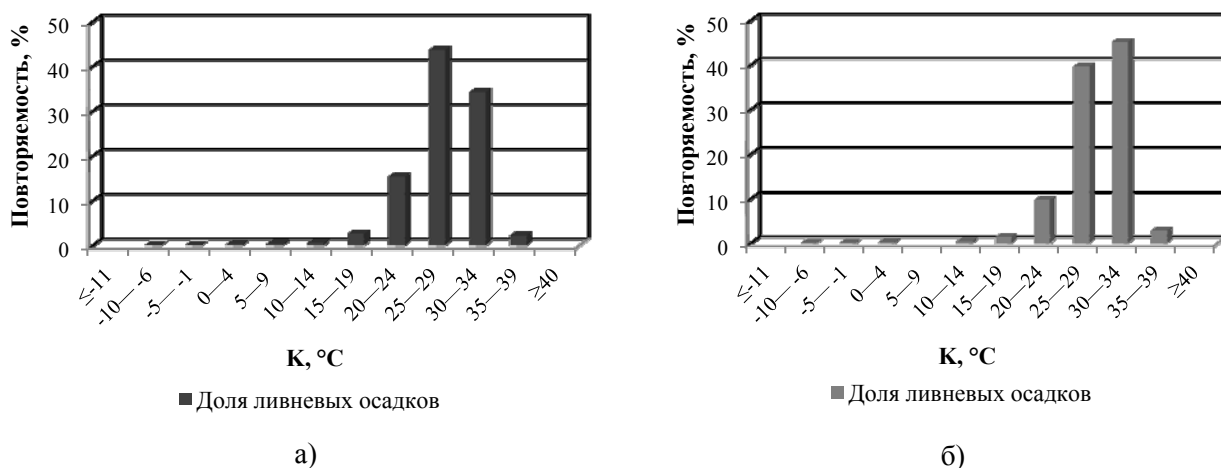


Рис. 6. Процентное распределение числа случаев ливней в зависимости от значений индекса К: а) до начала ливней; б) во время ливней

Максимальное значение индекса К, вычисленного во время ливней, равно 38 °С, минимальное значение равно –9 °С. На рис. 6. б наблюдается увеличение числа случаев ливней в промежуток значений К – 30–34 °С (повторяемость – 45 %). Это говорит о том, что при выпадении ливней, как правило, неустойчивость атмосферы увеличивается по сравнению с предшествующей обстановкой. Когда индекс К имеет значения в пределах 25–29 °С – повторяемость ливней составляет примерно 40 %, а при 20–24 °С – 10 %. Ни для одного из всех 668 случаев ливней не было достигнуто значение индекса 40 °С и выше. Осредненное значение индекса К для сильных ливней равно 32 °С, а для очень сильных дождей – 31 °С.

Перед началом определения пороговых значений для индексов неустойчивости, вычисленных по модели CFS, проанализируем корреляционную зависимость между предикторами (индексами неустойчивости) и предиктантом (количеством и интенсивностью ливневых осадков). Наибольшую корреляционную связь между значениями предикторов, рассчитанных в сроки, предшествующие началу исследуемого явления, и количеством выпавших ливневых осадков показал индекс LI ($k = -0,53$). Данное значение k , согласно распределению Стьюдента (при 95 % вероятности и $n-2$ степенями свободы), является значимым для выборки, состоящей из 25 наблюдений. Остальные индексы неустойчивости показали незначимую корреляционную связь с предиктантом: для CAPE – 0,23, для CIN – –0,29, для UVV – 0,28. Однако, абсолютно все индексы неустойчивости (CAPE, CIN, LI и UVV) показали значимую корреляционную связь со средней интенсивностью ливневых осадков. Наибольшее значение величины k принадлежит также индексу LI ($k = -0,60$), а у индексов CAPE, CIN и UVV этот параметр равен 0,51, –0,50 и 0,57 соответственно.

Между индексом LI и количеством выпавших ливневых осадков корреляционная связь составила –0,40, данное значение k является значимым для исследуемой выборки. Связь для остальных индексов неустойчивости получилась незначительной, причем самое минимальное значение k соответствует индексу CIN ($k = -0,22$). Между индексами CAPE, LI и UVV, а также средней интенсивностью ливней критерия ОЯ выявлена значимая корреляционная зависимость. Для индекса CAPE величина k составляет 0,84, а для индекса UVV – 0,82. Средняя интенсивность опасных ливневых осадков не связана с индексом CIN, так как значение величины k равно –0,22 (незначительная).

Рассмотрим характеристики оправдываемости прогноза наличия и отсутствия опасных ливневых осадков по значениям индексов CAPE, CIN и LI, предшествующие началу рассматриваемого опасного явления. Стоит отметить, что сначала параметры оправдываемости прогноза будут рассчитаны на основе уже существующих критических (пороговых) значений для рассматриваемых индексов.

Согласно табл. 1, CIN показал 0 % оправдываемости и предупрежденности отсутствия опасного ливня. Также у этого индекса наименьшая общая оправдываемость – 0,40. Наибольшее значение $P_{общ}$.

показал индекс CAPE – 0,52, также данный индекс «сработал» для всех прогнозируемых опасных ливней ($P_n = 1,00$), однако лишь в 57 % случаев спрогнозировал отсутствие ливней критерия ОЯ. Значения предупрежденности наличия (Π_n) и отсутствия (Π_o) опасных ливней для CAPE следующие: 0,08 (8 %) и 1,00 (100 %) соответственно. Иными словами индекс CAPE почти все случаи ливневых осадков критерия ОЯ пропустил. Ни для одного случая опасных ливней «не сработал» индекс LI, а его общая оправдываемость составила 0,48. Также у данного индекса наименьшее значение $T = -1,00$.

Таблица 1

Значения параметров оправдываемости индексов неустойчивости по данным модели CFS

Индекс	$P_{общ.}$	P_n	Π_n	P_o	Π_o	T
до начала опасного ливня						
CAPE	0,52	1,00	0,08	0,57	1,00	-0,92
CIN	0,40	0,45	0,77	0	0	0,52
LI	0,48	0	0	0,48	1,00	-1,00
во время опасного ливня						
CAPE	0,64	1,00	0,31	0,57	1,00	-0,44
CIN	0,52	0,52	1,00	0	0	0
LI	0,64	1,00	0,31	0,57	1,00	-0,44

Во время ливней одинаковые характеристики прогноза опасных ливней отмечены у индексов CAPE и LI. При низком значении критерия Пирса-Обухова – -0,44 общая оправдываемость составила 0,64. Данные индексы зафиксировали меньше половины случаев наличия опасных ливней ($\Pi_n = 0,31$). Предупрежденность отсутствия опасных ливней составила 100 %, однако оправдываемость составила около 57 %. При значении величины T , равной 0, у индекса CIN отмечена 100 % предупрежденность наличия опасных ливней, но около половины случаев прогноза не оправдались ($P_n = 0,52$). Это связано с тем, что значения данного индекса для всей выборки равны в пределах от 0 до -18 Дж/кг, а это говорит о сильной неустойчивости атмосферы и высокой вероятности наличия конвективных процессов и явлений. Именно поэтому оправдываемость (P_o) и предупрежденность (Π_o) отсутствия опасных ливней – 0. Общая оправдываемость индекса CIN составила 0,52.

Перейдем непосредственно к корректировке (для CAPE, CIN и LI) и определению (для UVV) пороговых значений. По окончании статистического анализа получились следующие результаты:

1. Для индекса CAPE уточнения пороговых (критических) значений не требуется, поскольку 9 случаев ливней критерия ОЯ приходится на значения CAPE от 0 до 200 Дж/кг, что говорит о слабой неустойчивости атмосферы. Остальные 4 случая относятся к значениям данного индекса от 1000 и более, которые совпадают с уже существующими критическими значениями. Поэтому можно сделать вывод, что индекс CAPE может «поймать» ливневый дождь лишь с вероятностью 31 %.

2. Значения индекса CIN во время опасных ливней колеблются в пределах от 0 до -30 Дж/кг. Слабая устойчивость атмосферы наблюдается и в сроках до начала явления – значения в пределах от 0 до -70 Дж/кг. Это говорит о том, что уже установленные пороговые значения, прогнозирующие опасные конвективные явления, могут применяться и при прогнозе опасных ливневых осадков в Пермском крае.

3. Большое количество случаев опасных ливневых дождей случались не только при отрицательных значениях индекса LI, но и выше нуля. Так, например, при значениях LI в диапазоне: от 3 до 5 °С – наблюдалось 3 случая (23 % от общего числа случаев), а при 0 - 2 °С – 4 случая (31 % от общего числа случаев). Пусть при значении LI от 5 °С и ниже стоит ожидать выпадения опасных ливней, тогда характеристики оправдываемости будут следующими: 1) для значений, предшествующих началу явления: $P_{общ.} = 0,80$, $P_n = 0,83$, $\Pi_n = 0,77$, $P_o = 0,77$, $\Pi_o = 0,83$, $T = 0,94$; 2) для значений во время явления: $P_{общ.} = 0,56$, $P_n = 0,55$, $\Pi_n = 0,85$, $P_o = 0,60$, $\Pi_o = 0,25$, $T = 0,10$. Значения LI (предшествующие) лучше прогнозируют наличие опасных ливней, а также их отсутствие, но величины данного индекса неустойчивости непосредственно в момент рассматриваемого явления увеличивают число ложных тревог, именно поэтому предупрежденность отсутствия опасных ливней составила всего лишь 0,25 и критерий Пирса-Обухова – 0,10. Обновленная градация позволила увеличить предупрежденность наличия опасного ливня с 0,31, которая отмечается при уже установленных критических значениях в научной литературе, на 0,85.

4. Скорость восходящих потоков (индекс UVV) до начала опасных ливней, изменяется в диапазоне: от 0 до 31 м/с (76 % от общего числа опасных ливней), и лишь один случай отмечался при значении данного индекса – 45 м/с. А в случаях, когда целый день ливневых осадков не наблюдалось, UVV равен 0 - 9 м/с. Во время опасных ливневых осадков значения индекса UVV в целом изменяются: в пределах 0–16 м/с (69 % от общего числа случаев), а при 44 м/с и более – 31 %.

В табл. 2 представлены значения параметров оправдываемости индекса UVV, рассчитанные при условии, что вероятность выпадения опасных ливней максимальна, когда значения данного индекса составляют от 44 м/с и выше. Видно, что, используя значения данного индекса в сроки – до начала опасного ливня (с разной заблаговременностью), общая оправдываемость прогноза ОЯ составит 52 %, причем предупрежденность равна всего лишь 0,08. Это говорит о том, что необходимо использовать исключительно прогностические значения индекса UVV в момент опасных ливней, то есть без всякой заблаговременности.

Таблица 2

Значения параметров оправдываемости индекса UVV

Индекс	$P_{общ.}$	P_n	$P_{пн}$	P_o	$P_{о}$	T
до начала опасного ливня						
UVV	0,52	1,00	0,08	0,50	1,00	0,08
во время опасного ливня						
UVV	0,64	1,00	0,31	0,57	1,00	0,31

Общая оправдываемость и T увеличились до 0,64 и 0,31 соответственно, когда данные параметры были рассчитаны по значениям UVV, характеризующие состояние атмосферы во время явления, также увеличилась и предупрежденность ОЯ – 0,31. Оправдываемость прогноза наличия опасного ливня составляет 100 %, а его отсутствие – 57 %. Предупрежденность отсутствия ОЯ равна 100 %.

Заключение

Средняя интенсивность ливневых осадков теплого периода за 2011–2019 гг. составила 0,67 мм/мин, а для очень сильного дождя – 0,15 мм/мин. Максимальное число ливней приходится на 2012 г. (132 случая), а наименьшее – в 2018 и 2019 г. В июне и июле, как правило, фиксируется больше число случаев ливней.

Установлено, что наиболее благоприятным временем суток для выпадения ливневых осадков в целом считается вторая половина дня и вечер.

Как правило, ливневые осадки выпадают при следующих значениях рассматриваемых метеорологических величин:

- температура воздуха у земли в диапазоне: от 10 до 20 °С;
- температура точки росы у земли от 10 до 20 °С включительно;
- относительная влажность от 81 до 100 % включительно;
- атмосферное давление от 1000,1 до 1020 гПа;
- направление приземного ветра – северо-западное–северное и юго-западное–южное;
- скорость ветра у земли 2 – 5 м/с.

Чаще всего выпадение ливневых осадков обусловлено фронтальной деятельностью. Фронтальные ливневые осадки вызваны, чаще всего, холодным фронтом. Внутримассовые ливни чаще всего выпадают при следующих синоптических ситуациях: ложбина циклона, теплый сектор циклона (частного циклона), частный циклон и тыловая часть циклона.

Выпадению ливневых осадков чаще всего способствует циклоническая деятельность атмосферы или восточная периферия антициклона.

Статистический анализ индексов неустойчивости, рассчитанные по данным реанализа ERA-Interim, позволил установить следующие пороговые значения предикторов для прогноза ливневых осадков: 3D – 10 °С и выше (повторяемость около 70 % от общего числа случаев); VT – 20–29 °С и выше (вероятность выпадения ливневых осадков составляет около 99 %); СТ – 20–24 °С и выше (вероятность составляет примерно 96 %); TT – 45 °С и выше (вероятность около 89 %).

Из всех индексов неустойчивости, вычисленных по модели CFS, для прогноза ливневых осадков целесообразно использовать индекс LI, при этом необходимо поднять критическое значение с -6°C и ниже до 5°C и ниже.

Благодарности

Авторы выражают благодарность Д.Н. Полину за помощь в проведении расчетов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. РД 52.04.563–2013. Инструкция по подготовке и передаче штормовых сообщений наблюдательным подразделениям (введен в действие приказом Росгидромета от 27 декабря 2013 г. № 730), 2013. 49 с.
2. Наставление по гидрометеорологическим станциям и постам. Вып. 3, ч. 1. Метеорологические наблюдения на станциях. Л.: Гидрометеиздат, 1978. С. 117-119.
3. Загребина Т.А. Статистический анализ матриц сопряженности опасных явлений погоды по территории Удмуртии // Географический вестник. 2008. № 2 (8). С. 167-178.
4. Шаропова А.А., Кужевская И.В., Каштанова К.А., Поляков Д.В. Характеристики экстремальных осадков на территории Западной Сибири // Географический вестник. Томск: Томский гос. ун-т, 2017. № 3 (42). С. 88-98.
5. Ladehoff F. Evaluation of Selected Atmospheric Indices for the Prediction of Thunderstorms at Omaha, Nebraska. University of Nebraska-Lincoln, 1997. P. 8-20.
6. Miller R.C. Notes on Analysis and Severe Storm Forecasting Procedures of the Air Force Global Weather Central, Air Weather Service Tech. Rep. 200 (Rev.), Air Weather Service, Scott Air Force Base, Ill, 1972. P. 23-42.
7. POGODA.BY. URL: <http://pogoda.by/glossary/?nd=8&id=78> (дата обращения: 22.04.2020).
8. Peppier R.A. A review of static stability indices and related thermodynamic parameters. Climate and meteorology section Illinois state water survey champaign, il 61820, 1988. P. 7-11.
9. Быков А.В., Ветров А.Л., Калинин Н.А. Прогноз опасных конвективных явлений в Пермском крае с использованием глобальных прогностических моделей // Тр. Гидрометцентра России. 2017. Вып. 363. С. 101-119.
10. Калинин Н.А. Условия формирования и прогноз сильных осадков с помощью индексов неустойчивости атмосферы на территории Уральского Прикамья // Географический вестник. Пермь, 2019. №4 (51). С. 96-110.
11. Сивков Б.А., Калинин Н.А. Особенности термодинамического состояния атмосферы при сильных осадках на территории Пермского края // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2020. № 1 (375). С. 83-95.
12. Doswell C.A. and Shultz D.M. On the use of indices and parameters in forecasting severe storms // Electronic J. Severe Storms Meteorology. 2006. Vol. 1, № 3. P. 1-14.
13. РД 52.27.284-91. Методические указания. Проведение производственных (оперативных) испытаний новых и усовершенствованных методов гидрометеорологических и гелиогеофизических прогнозов. М.: Гидрометеиздат, 1991. 150 с.

Поступила в редакцию 06.10.2020

Калинин Николай Александрович, доктор географических наук, профессор,
заведующий кафедрой метеорологии и охраны атмосферы
E-mail: kalinin@psu.ru

Сивков Богдан Алексеевич, аспирант кафедры метеорологии и охраны атмосферы
E-mail: sivkovbogdan@yandex.ru

Дмитриев Александр Васильевич, магистр кафедры метеорологии и охраны атмосферы
E-mail: sasha-dmitriev-06101995@mail.ru

ФГБОУ ВО «Пермский государственный национальный исследовательский университет»
614990, Россия, г. Пермь, ул. Букирева, 15

N.A. Kalinin, B.A. Sivkov, A.V. Dmitriev

FORMATION CONDITIONS OF WARM-SEASON STORM RAINFALL IN PERM REGION

DOI: 10.35634/2412-9518-2020-30-3-295-306

The article deals with the issue of the formation conditions and possibility of predicting storm rainfall in the territory of Perm region using atmospheric instability indices. In the course of the study, the spatial and temporal distribution of storm rainfall cases was assessed, as well as the most favorable values of meteorological parameters and synoptic situations contributing to rainfall were determined. The instability indices were calculated based on the ERA-Interim reanal-

ysis of the spectral model of the European Center for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF) and the reanalysis of the American hydrodynamic model Climate Forecast System (CFS). On the basis of correlation analysis, the dependence of instability indices on the amount and average intensity of storm rainfall was estimated. The critical values of the considered instability indices were determined and corrected in relation to the studied territory. The study showed that the most frequent storm rainfall is observed in June and July in the afternoon and evening. It was found that storm rainfall is mainly associated with the passage of cold fronts. The assessment of the quality of instability indices has shown the feasibility of their use for the forecast and diagnosis of storm precipitation, including in the gradation of this dangerous phenomenon.

Keywords: storm rainfall, heavy downpours, very heavy rains, Perm region, reanalysis, instability indices, forecast.

REFERENCES

1. RD 52.04.563–2013. Instruksiya po podgotovke i peredache shtormovykh soobshcheniy nablyudatel'nym podrazdeleniyam (vveden v deystvie prikazom Rosgidrometa ot 27 dekabrya 2013 g. N 730) [Guidance document 52.04.563-2013. Instructions for the preparation and transmission of storm messages to the Supervisory units (put into effect by the order of Roshydromet of December 27, 2013 N 730)], 2013. 49 p. (in Russ.).
2. Nastavlenie po gidrometeorologicheskim stantsiyam i postam, vyp. 3, ch. 1. Meteorologicheskie nablyudeniya na stantsiyakh [Instruction on hydrometeorological stations and posts, iss. 3, part 1. Meteorological observations at stations], Leningrad: Gidrometeoizdat Publ., 1985, 301 p. (in Russ.).
3. Zagrebina T.A. [Statistical analysis of the matrix of contingency of hazardous weather phenomena in the territory of Udmurtia], in *Geograficheskij Vestnik*, 2008, no.2 (8), pp.167–178 (in Russ.).
4. Sharapova A.A., Kuzhevskaya I.V., Kashtanova K.A., Polyakov D.V. [Characteristics extreme precipitation in Western Siberia], in *Geograficheskij Vestnik*, Tomsk: Tomskiy Gos. Univ., 2017, no. 3 (42), pp. 88-98 (in Russ.).
5. Ladehoff F. Evaluation of Selected Atmospheric Indices for the Prediction of Thunderstorms at Omaha, Nebraska. University of Nebraska-Lincoln, 1997, pp. 8–20.
6. Miller R.C. Notes on Analysis and Severe Storm Forecasting Procedures of the Air Force Global Weather Central, Air Weather Service Tech. Rep. 200 (Rev.), Air Weather Service, Scott Air Force Base, III, 1972, pp. 23–42.
7. POGODA.BY. Available at: <http://pogoda.by/glossary/?nd=8&id=78> (accessed: 22.04.2020).
8. Peppier R.A. A review of static stability indices and related thermodynamic parameters. Climate and meteorology section Illinois state water survey campaign, il 61820, 1988, pp. 7–11.
9. Bykov A.V., Vetrov A.L., Kalinin N.A. [The forecast of dangerous convective phenomena in the Perm Krai with use of global prognostic models], in *Trudy Gidromettsentra Rossii*, 2017, iss. 363, pp. 101-119 (in Russ.).
10. Kalinin N.A. [Conditions of formation and forecast of heavy precipitation with the help of indices of atmospheric instability in the territory of Ural Prikamye], in *Geograficheskij Vestnik*, 2019, no. 4(51), pp. 96–112 (in Russ.).
11. Sivkov B.A., Kalinin N.A. [Peculiarities of the thermodynamic state of the atmosphere under heavy precipitation in the Perm region], in *Gidrometeorologicheskie issledovaniya i prognozy*, 2020, no.1 (375), pp.83–95 (in Russ.).
12. Doswell C.A. and Shultz D.M. On the use of indices and parameters in forecasting severe storms, in *Electronic J. Severe Storms Meteorology*, 2006, vol. 1, no 3, pp. 1–14.
13. RD 52.27.284-91. Metodicheskie ukazaniya. Provedenie proizvodstvennykh (operativnykh) ispytaniy novykh i usovershenstvovannykh metodov gidrometeorologicheskikh i geliogeofizicheskikh prognozov [Guidance document 52.27.284-91. Methodological guidelines. Performance of production (operational) tests of new and improved methods of hydrometeorological and heliogeophysical forecasts], Moscow: Gidrometeoizdat, 1991, 150 p. (in Russ.).

Received 06.10.2020

Kalinin N.A., Doctor of Geography, Professor,

Head of the Department of Meteorology and Atmosphere Protection

E-mail: kalinin@psu.ru

Sivkov B.A., Postgraduate Student of Department of Meteorology and Atmosphere Protection

E-mail: sivkovbogdan@yandex.ru

Dmitriev A.V., Master of Department of Meteorology and Atmosphere Protection

E-mail: sasha-dmitriev-06101995@mail.ru

Perm State National Research University

Bukireva st., 15, Perm, Russia, 614990