

МЕТЕОРОЛОГИЯ

УДК 501.509.5

DOI: 10.17072/2079-7877-2019-4-96-112

**УСЛОВИЯ ФОРМИРОВАНИЯ И ПРОГНОЗ СИЛЬНЫХ ОСАДКОВ С ПОМОЩЬЮ
ИНДЕКСОВ НЕУСТОЙЧИВОСТИ АТМОСФЕРЫ НА ТЕРРИТОРИИ
УРАЛЬСКОГО ПРИКАМЬЯ****Николай Александрович Калинин**

Scopus ID: 7006661915, WoS Researcher ID: A-4882-2014, SPIN-код: 3209-4166, Author ID: 67236

e-mail: kalinin@psu.ru

Пермский государственный национальный исследовательский университет, Пермь

Выявлены условия формирования и определены возможности прогноза сильных осадков на территории Уральского Прикамья с помощью индексов неустойчивости атмосферы. Под обобщающим термином «сильные осадки» в данной работе понимается сильный ливень и очень сильный дождь, т.е. осадки в теплый период года, достигшие критерия опасного метеорологического явления. Исследование проводилось на примере территории Уральского Прикамья, где располагаются 25 метеостанций, а также 19 гидропостов. Расчет индексов осуществлялся на основе данных реанализа гидродинамической модели Climate Forecast System (CFS) за теплый период года (май–сентябрь) с 1979 по 2015 г. Произведена оценка синоптических условий, формирующих сильные осадки с привлечением данных реанализа по модели CFS с шагом по времени 1 ч и шагом по пространству 0,5°. Оценивались такие характеристики циклонов, как тип циклона, минимальное давление в центре, траектория и скорость смещения, диаметр и площадь, а также вертикальная протяженность и стадия развития. Приводится обзор различных физико-статистических параметров (индексов) неустойчивости атмосферы, предназначенных для прогноза опасных метеорологических явлений конвективного происхождения. Проведен анализ значений индексов в дни, когда наблюдались сильные осадки. Определены критические значения индексов неустойчивости, при которых наблюдаются сильные осадки. Приведены результаты применения индексов неустойчивости для прогноза сильных осадков на территории Уральского Прикамья.

Ключевые слова: сильные осадки, очень сильный дождь, сильные ливни, индексы неустойчивости атмосферы, прогноз.

**HEAVY PRECIPITATION FORMATION CONDITIONS AND FORECASTING WITH THE
ATMOSPHERIC INSTABILITY INDICES IN THE TERRITORY OF URAL PRIKAMYE****Nikolay A. Kalinin**

Scopus ID: 7006661915, WoS Researcher ID: A-4882-2014, Author ID: 67236, SPIN-code: 3209-4166

e-mail: kalinin@psu.ru

Perm State University, Perm

The study determines formation conditions for heavy precipitation in the territory of Ural Prikamye and identifies possibilities of forecasting it based on indices of atmospheric instability. In this work, the generic term ‘heavy precipitation’ means heavy downpour and very heavy rain, i.e. precipitation in the warm period of the year that has reached the criterion of a dangerous meteorological phenomenon. The study was conducted through the example of Ural Prikamye, where 25 weather stations, as well as 19 hydraulic posts, are located. The indices were calculated based on the data from reanalysis of the Climate Forward System (CFS) hydrodynamic model for the warm season (May–September) for the period from 1979 to 2015. The synoptic conditions forming heavy precipitation were estimated with the application of data from reanalysis according to the CFS model with a time step of 1 h and a space step of 0.5°. Cyclone characteristics, such as



cyclone type, minimum center pressure, trajectory and displacement speed, diameter and area, as well as vertical extent and stage of development, were assessed. An overview is given of various physical and statistical parameters (indices) of atmospheric instability intended for prediction of dangerous meteorological phenomena of convective origin. Index values were analyzed for the days when heavy precipitation was observed. Critical values of instability indices at which heavy precipitation will be observed have been determined. The results of instability indices application when forecasting heavy precipitation in the territory of Ural Prikamye are provided.

Key words: heavy precipitation, very heavy rain, heavy downpours, atmospheric instability indices, forecast.

Введение

Сильные осадки относятся к опасным метеорологическим явлениям вследствие их разрушительной силы. В зависимости от интенсивности и продолжительности они могут приводить к мощным дождевым паводкам на реках, парализовать движение железнодорожного и автомобильного транспорта, осложнить работу жилищно-коммунальных служб, а также повлиять на формирование урожая сельскохозяйственных культур, поэтому точный и заблаговременный прогноз возникновения сильных осадков и их количества является актуальной задачей [1; 3]. Под обобщающим термином «сильные осадки» в данной работе будем понимать сильный ливень и очень сильный дождь, т.е. осадки в теплый период года, достигшие критерия опасного метеорологического явления (ОЯ). Согласно [8] критерием сильного ливня является количество выпавших осадков не менее 30 мм за период не более 1 ч; очень сильного дождя – количество выпавших осадков не менее 50 мм (а в ливнеопасных районах не менее 30 мм) за период не более 12 ч.

В исследованиях российских и зарубежных авторов были выявлены большие возможности использования индексов неустойчивости атмосферы для наблюдения за развитием мезомасштабной конвекции и прогноза образования опасных конвективных явлений, включая сильные ливни и очень сильные дожди [1; 2; 4–8; 11].

Целью работы стало выявление условий формирования и определение возможности прогноза сильных осадков на территории Уральского Прикамья с помощью индексов неустойчивости атмосферы.

Материалы и методы исследования

Исследование проводилось на примере территории Уральского Прикамья, где располагаются 25 метеостанций, 5 из которых находятся в ливнеопасных районах (Вая, Губаха, Бисер, Кунгур и Кын), а также 19 гидропостов. Для расчета индексов привлекались данные реанализа гидродинамической модели Climate Forecast System (CFS) за теплый период года (май–сентябрь) с 1979 по 2015 гг.

Практически все существующие методы прогноза конвективных явлений основаны на использовании данных аэрологического зондирования атмосферы, по результатам которого определяются степень неустойчивости атмосферы и мощность конвективно-неустойчивого слоя. Чем большей мощности в своем вертикальном развитии достигнут конвективные ячейки, тем интенсивнее будут опасные явления погоды, которые они продуцируют: ливни, грозы, град, смерчи [13].

В негидростатических мезомасштабных моделях для прогноза опасных конвективных явлений погоды используются количественные значения индексов, характеризующих конвекцию по ряду параметров [11]. Наиболее часто применяются следующие.

Индекс плавучести (Lifted Index, LI) [12] 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:

$$LI = T'_{500} - T'_{p,500},$$

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

Метеорология

Калинин Н.А.

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. Если значения LIFT больше 0°C , то атмосфера считается устойчивой, но слабая конвекция возможна и при значениях в интервале от 0 до 3°C .

Индекс LI может рассчитываться для частиц воздуха, поднявшихся от различных изобарических поверхностей, и имеет несколько разновидностей [11]:

– LI, рассчитанный для частицы воздуха, поднявшейся от земной поверхности (Surface Based LI, SB LI).

– LI, рассчитанный для частицы воздуха, поднявшейся от перемешанного слоя (Mixed Layer LI, ML LI). В том слое атмосферы, от которого поднимается частица, усредняются температура и отношение смеси. Чаще всего берется перемешанный слой толщиной 30, 45 и 90 гПа над земной поверхностью. Усреднение необходимо для того, чтобы исключить негативное влияние приземных температуры и влажности.

– LI, рассчитанный для частицы воздуха, поднявшейся от наиболее неустойчивого перемешанного слоя (Most Unstable Planetary Boundary Layer LI, MU PBL LI). Наиболее неустойчивым слоем называется слой с наибольшей эквивалентно-потенциальной температурой (ЭПТ). Чаще всего выбирается наиболее неустойчивый перемешанный слой толщиной 30 гПа в пределах от земной поверхности до высоты 180 гПа над ней.

Потенциальная доступная энергия неустойчивости (Convective Available Potential Energy, CAPE) [12] представляет собой работу, которую потенциально может совершить частица воздуха при адиабатическом подъеме. При значениях CAPE от 2500 Дж/кг и более стоит ожидать развития опасных конвективных явлений. CAPE рассчитывается по формуле

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

где g – ускорение свободного падения, м/с^2 ; T'_p и T' – виртуальная температура окружающей среды и частицы воздуха соответственно, $^{\circ}\text{C}$; LFC – уровень свободной конвекции, гПа; EL – уровень выравнивания температуры, гПа.

Скорость восходящих потоков UVV , м/с можно приближенно оценить по формуле [9]

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

CAPE, аналогично индексу LI, имеет несколько разновидностей [11]:

– CAPE, рассчитанная для частицы воздуха, поднявшейся от земной поверхности (Surface Based CAPE, SB CAPE).

– CAPE, рассчитанная для частицы воздуха, поднявшейся от перемешанного слоя (Mixed Layer CAPE, ML CAPE). В том слое атмосферы, от которого поднимается частица, усредняются температура и отношение смеси. Чаще всего берется перемешанный слой толщиной 30, 45 и 90 гПа над земной поверхностью.

– CAPE, рассчитанная для частицы воздуха, поднявшейся от наиболее неустойчивого перемешанного слоя (Most Unstable Planetary Boundary Layer CAPE, MU PBL CAPE). Чаще всего выбирается наиболее неустойчивый перемешанный слой толщиной 30 гПа в пределах от земной поверхности до 180 гПа над ней.

– CAPE, рассчитанная для частицы воздуха, поднявшейся от наиболее неустойчивого слоя (Most Unstable CAPE, MU CAPE). Чаще всего выбирается наиболее неустойчивый слой в пределах от земной поверхности до 255 или 300 гПа над ней.

Индекс CIN – количество энергии, необходимой частице воздуха для преодоления в нижней тропосфере задерживающего слоя. В этом слое перемещение воздушных частиц по вертикали вверх затруднено или полностью исключено. В частности, слои инверсии температуры воздуха имеют наиболее устойчивую стратификацию и препятствуют развитию восходящих движений воздуха. К разрушению задерживающего слоя приводят интенсивный дневной прогрев, увлажнение

Метеорология

Калинин Н.А.

пограничного слоя атмосферы (адвекция влажного воздуха или испарение с местных источников влаги) и подъем воздуха синоптического масштаба.

Индекс CIN можно вычислить по следующей формуле [11; 12]:

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

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

Энергия противодействия конвекции записывается отрицательным числом. Значения $CIN < -200 Дж/кг$ достаточно для прекращения конвекции в атмосфере.

Относительная завихренность шторма (Storm Relative Helicity, SRH) [13] вычисляется по формуле

$$SRH = - \int_0^h \vec{k} (\vec{v}(z) - \vec{c}) \times \frac{\partial \vec{v}(z)}{\partial z} dz,$$

где \vec{k} – вертикальная компонента вектора скорости ветра у земли, m/c ; $\vec{v}(z)$ – горизонтальная составляющая вектора скорости ветра на высоте z , m/c ; \vec{c} – вектор ведущего потока, m/c .

В зависимости от высоты интегрирования h индекс SRH может быть применен для разных целей. Если рассчитывать индекс в слое 3 км от земли (или толщиной 255 $гПа$), то при его значениях $150 m^2/c^2$ и более стоит ожидать возникновения штормов с вращением; если рассчитывать индекс до высоты 1 км (или толщиной 90 $гПа$), то при его значениях $75 m^2/c^2$ и более есть условия для возникновения смерчей.

Индекс потенциальной неустойчивости (EPI) [11] оценивает стратификацию в средней тропосфере как разность эквивалентно-потенциальной температуры Θ_e ($^{\circ}C$) на изобарических поверхностях 500 и 850 $гПа$:

$$EPI = \Theta_{e,500} - \Theta_{e,850}.$$

Нулевые и отрицательные значения индекса указывают на значительную неустойчивость в средней тропосфере и наличие благоприятных условий для развития мезомасштабных конвективных систем.

Индекс Вайтинга (K Index) [10] рассчитывается по формуле

$$K = T_{850} - T_{500} + Td_{850} - DD_{700},$$

где T_{850} и T_{500} – температура воздуха на изобарических поверхностях 850 и 500 $гПа$ соответственно, $^{\circ}C$; Td_{850} – температура точки росы на изобарической поверхности 850 $гПа$, $^{\circ}C$; DD_{700} – дефицит точки росы на изобарической поверхности 700 $гПа$, $^{\circ}C$.

При значениях индекса $40^{\circ}C$ и более стоит ожидать развития опасных конвективных явлений. Также существует модификация индекса Вайтинга, в которой вместо температуры воздуха и точки росы на изобарической поверхности 850 $гПа$ взяты температуры воздуха и точки росы у земли.

Если K-Index принимает значения в интервале $25-30^{\circ}C$, то это указывает на слабо неустойчивое состояние атмосферы. При значениях от 30 до $35^{\circ}C$ состояние атмосферы неустойчивое и высока вероятность ливня, но возможны с невысокой степенью вероятности и грозы. Значения индекса в интервале $35-40^{\circ}C$ свидетельствуют о сильно неустойчивом состоянии атмосферы и наличии потенциала для развития грозы с ливнем, а при значениях индекса больше $40^{\circ}C$ атмосфера крайне неустойчива.

Индекс Томпсона (Thompson Index, TI) [15] состоит из композиции K Index и Lifted Index. При тестировании индекса над территорией США была получена связь опасных конвективных явлений и значений индекса 40 и более. Для расчета целесообразно использовать индекс плавучести для наиболее неустойчивого перемешанного слоя (MULI):

Метеорология

Калинин Н.А.

$$TI = K - MULI_{PBL,0-180}.$$

Индекс мезомасштабных конвективных систем (Mesoscale Convective Systems Index, MCS) [11] также включает в себя несколько разнородных параметров: Lifted Index, сдвиг ветра в нижнем слое и адвекцию тепла TA_{700} , °С·м/с на изобарической поверхности 700 гПа:

$$MCS = \frac{MULI_{PBL,0-180} + 4.4}{3.3} + \frac{LLS_{0-255}}{5} + \frac{TA_{700} + 4.5 \times 10^{-5}}{7.3 \times 10^{-5}}.$$

При неотрицательных значениях индекса следует ожидать развития мезомасштабных конвективных систем.

Индекс PW (кг/м²), характеризующий запас влаги в атмосфере

$$PW = \frac{1}{g} \sum_{i=1}^k q \Delta p,$$

где $g = 9,8 \text{ м/с}^2$ – ускорение свободного падения; q – массовая доля водяного пара, г/кг; p – давление, гПа.

На первом этапе работы была произведена оценка синоптической ситуации с привлечением данных реанализа по модели CFS с шагом по времени 1 ч и шагом по пространству 0,5°. Для анализа использовались данные о приземном давлении, а также геопотенциальной высоте поверхностей 850, 700, 500 и 300 гПа. Также оценивались характеристики циклонов, такие как тип циклона, минимальное давление в центре, траектория и скорость смещения, диаметр и площадь, а также вертикальная протяженность и стадия развития.

На втором этапе была собрана информация по гидродинамической модели GFS с результатами по пространственному распределению значений индексов на исследуемой территории. Для этого применялось программное обеспечение OpenGRADs, с помощью которого была произведена работа с файлами формата grib и grib2, где содержатся необходимые данные. Исходный материал использовался с интернет ресурса Национального управления океанических и атмосферных исследований США (National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA). Для более детального исследования применялся шаг по времени равный 1 ч. После обработки исходного материала в программе OpenGRADs конечные результаты сохранялись в формате tiff, что позволило снимать значения индексов неустойчивости в узлах сетки с помощью программного обеспечения QGIS.

На завершающем третьем этапе производился анализ значений индексов в дни, когда наблюдалось опасное явление, сопоставление информации модели GFS с данными метеостанций в срок, когда было зарегистрировано опасное конвективное явление. Наконец, определялись критические значения индексов неустойчивости, при которых будет наблюдаться одно из опасных явлений.

Результаты и их обсуждение

В работе была предпринята попытка уточнения критериев индексов, при которых наблюдались опасные конвективные явления. Для этого проводился статистический анализ, который позволил найти зависимость между значениями индекса и интенсивностью явления, а также выявить значимые предикторы (в нашем случае это индексы неустойчивости атмосферы). Затем, после поиска взаимосвязи, необходимо найти либо интервалы значения индексов, либо какое-то определенное значение. При этом обязательным условием является проверка качества прогноза, т.е. при отобранных значениях индексов исследуемое конвективное явление должно наблюдаться. В связи с этим были рассчитаны следующие характеристики оправдываемости прогноза.

Общая оправдываемость ОЯ:

$$Ac_G = \frac{ts_{11} + ts_{22}}{ts_{00}} 100\% ,$$

Метеорология

Калинин Н.А.

где ts_{11} – число оправдавшихся прогнозов ОЯ, ts_{22} – число оправдавшихся прогнозов отсутствия ОЯ, ts_{00} – общее число прогнозов наличия ОЯ.

Оправдываемость наличия ОЯ:

$$Ac = \frac{ts_{11}}{ts_{10}} 100\% ,$$

где ts_{10} – число прогнозов наличия ОЯ.

Предупрежденность наличия ОЯ:

$$W = \frac{ts_{11}}{ts_{01}} 100\% ,$$

где ts_{01} – число случаев ОЯ.

Оправдываемость отсутствия ОЯ:

$$Ac_{no} = \frac{ts_{22}}{ts_{20}} 100\% ,$$

где ts_{20} – число прогнозов отсутствия ОЯ.

Предупрежденность отсутствия ОЯ:

$$W_{no} = \frac{ts_{22}}{ts_{02}} 100\% ,$$

где ts_{02} – число случаев отсутствия ОЯ.

Критерий Пирса-Обухова:

$$T = \frac{ts_{11}}{ts_{01}} - \frac{ts_{12}}{ts_{02}} ,$$

где ts_{12} – число неоправдавшихся прогнозов наличия ОЯ.

За рассматриваемый период (1979–2015 гг.) очень сильные дожди (≥ 50 мм/12 ч) были зафиксированы наблюдательной сетью (метеостанции и гидропосты) 91 раз, что позволяет провести комплексную статистическую обработку данных по условиям их возникновения. Исследована динамика числа случаев сильных дождей, определены преобладающие синоптические ситуации, а также направления и скорости смещения циклонов, характерные для случаев сильных дождей. Проанализированы глубина, стадия развития, вертикальная протяженность, диаметр и площадь циклонов.

В течение рассматриваемого периода отмечено возрастание числа случаев очень сильных дождей в среднем от 1,6 до 3,5 случаев в год (рис. 1).

Практический интерес представляет выявление преобладающих типов синоптических ситуаций, при которых фиксируются очень сильные дожди. Анализ приземных полей давления показал, что очень сильные дожди в 89% связаны с влиянием циклонов и их фронтальных систем. В 8% случаев очень сильные дожди формируются в антициклоне, в основном на его западной и северной периферии. В малоградиентных полях давления зафиксировано лишь 3% случаев очень сильных дождей. По району возникновения циклоны подразделяются на 6 типов: южные, юго-западные, западные, северо-западные, северные и местные. Южные циклоны возникают в районе Каспийского моря и над Северным Казахстаном. Юго-западные и западные циклоны – в районе Черного моря и над Северной Европой. Северо-западные циклоны формируются над Норвежским либо Белым морем, северные – над Баренцевым морем и в районе архипелага Новая Земля. Местным циклоном в контексте данного исследования называется циклон, возникший непосредственно над исследуемой территорией.

Метеорология
Калинин Н.А.

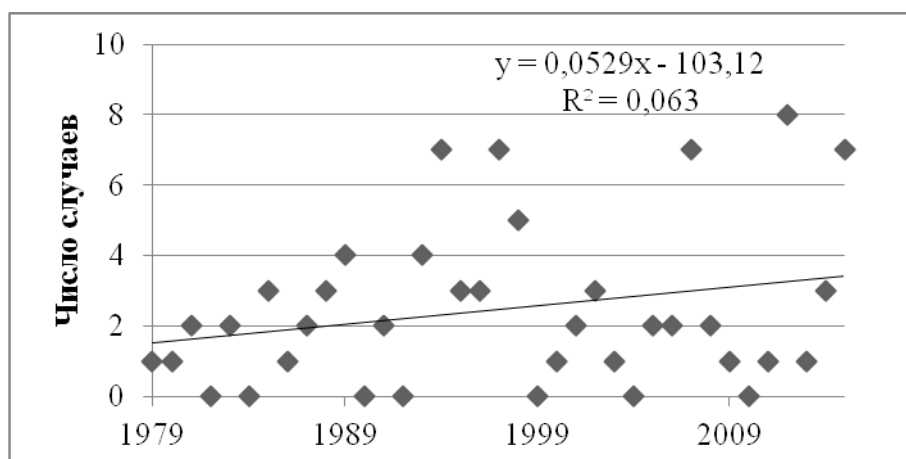


Рис. 1. Динамика числа случаев очень сильных дождей на территории Уральского Прикамья за 1979–2015 гг.
Fig. 1. Dynamics of very heavy rain cases in the territory of the Ural Priskamye for 1979–2015

Наиболее часто очень сильные дожди наблюдаются при смещении на территорию Уральского Прикамья южных и западных циклонов. На долю этих типов циклонов приходится 35 и 19% соответственно от общего числа случаев. В 11% случаев очень сильные дожди наблюдаются при смещении северных циклонов, в 10% случаев – при формировании местных циклонов непосредственно над территорией исследования или вблизи ее границ. Наименьшее число случаев очень сильных дождей зафиксировано при смещении юго-западных и северо-западных циклонов: лишь 9 и 5% соответственно. Таким образом, наибольшее число случаев очень сильных дождей в Уральском Прикамье связано с влиянием южных, западных и северных циклонов.

Скорость смещения циклонов, при которых наблюдались очень сильные дожди, изменялась от 3 до 43 км/ч. Среднее значение составило 18 км/ч. На рис. 2а представлено распределение числа случаев очень сильных дождей в зависимости от скорости смещения циклонов.

В ходе исследования для каждого случая влияния циклона была определена его глубина. Среднее значение глубины циклонов, при которых наблюдаются очень сильные дожди, составляет 999,7 гПа. Минимальное и максимальное значения равны соответственно 982,0 и 1014,0 гПа. На рис. 2б показано распределение числа случаев сильных дождей в зависимости от глубины циклонов.

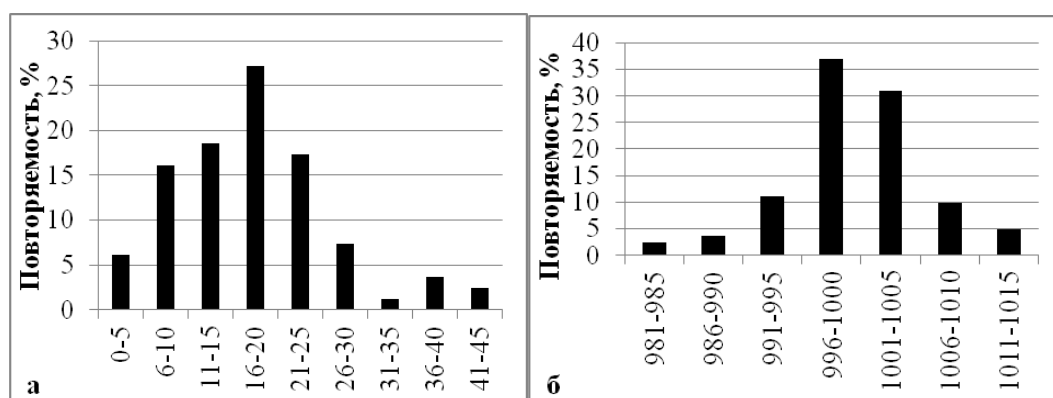


Рис. 2. Распределение (%) числа случаев очень сильных дождей в зависимости:
а – от скорости смещения циклонов, км/ч; б – от глубины циклонов, гПа

Fig. 2. Distribution (%) of very heavy rain cases depending on: the cyclone displacement speed, km/h (a); the cyclone depth, hPa (b)

Особенно ценной для использования в оперативной практике является информация о преобладающих стадиях развития циклонов, при которых наблюдаются очень сильные дожди. Наибольшее число случаев очень сильных дождей отмечается в молодых циклонах, а также в

Метеорология
Калинин Н.А.

циклонах, находящихся на стадии заполнения. Доля этих стадий развития в общем числе случаев составляет 35 и 38% соответственно. В 22% случаев очень сильные дожди зафиксированы в циклонах, находящихся на стадии максимального развития и лишь в 5% случаев на стадии их возникновения.

С целью изучения геометрических характеристик циклонов, с которыми связаны очень сильные дожди, для каждого случая определялись диаметр и площадь циклона. На рис. 3 показано распределение числа случаев очень сильных дождей в зависимости от диаметра и площади циклона.

Диаметр циклонов, при которых наблюдались очень сильные дожди, изменялся от 200 до 1800 км. Среднее значение составило 800 км. Около 80% случаев очень сильных дождей приходится на циклоны, диаметр которых не превышает 1200 км. Площадь циклонов изменялась от 0,03 до 2,45 млн км². Среднее значение площади составило 0,60 млн км², при этом 80% случаев связано с небольшими циклонами, площадь которых не превышает 1,10 млн км².

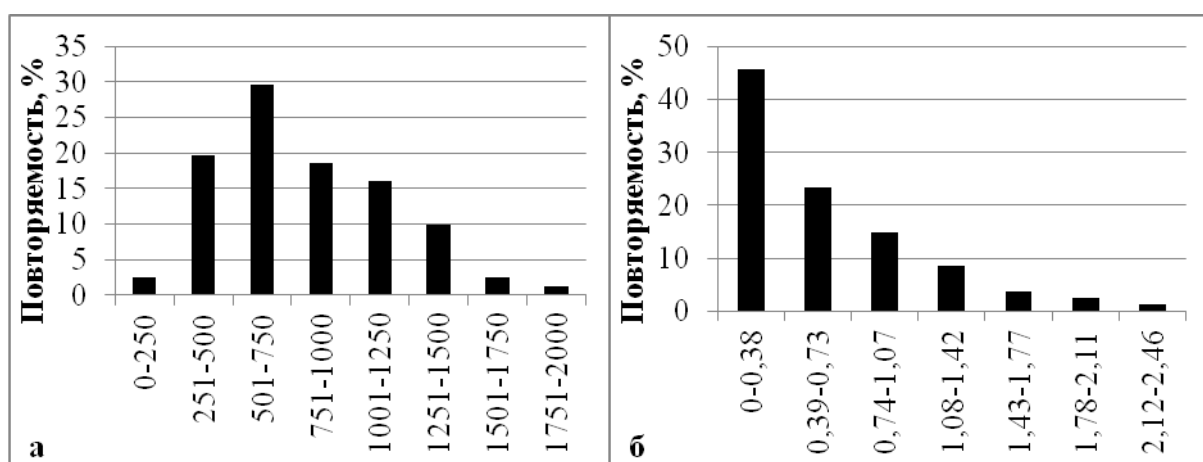


Рис. 3. Распределение (%) числа случаев сильных дождей в зависимости от:
а – диаметра циклонов, км; б – площади циклонов, млн км²

Fig. 3. Distribution (%) of heavy rain cases depending on: the cyclone diameter, km (a); the cyclone area, million km² (b)

За рассматриваемый период (1979–2015 гг.) сильные ливни были зафиксированы наблюдательной сетью (метеостанции и гидропосты) 14 раз и наблюдаются с периодичностью раз в 2–3 года.

Анализ приземных полей давления показал, что сильные ливни в 75% связаны с влиянием циклонов и их фронтальных систем. В 25% случаев сильные ливни формируются в антициклонах в основном на их северо-восточной периферии.

Наиболее часто сильные ливни наблюдаются при смещении на территорию Уральского Прикамья юго-западных и южных циклонов. На долю этих типов циклонов приходится по 25% общего числа случаев. В 17% случаев сильные ливни зафиксированы при смещении северо-западных циклонов, в 8% случаев – при наличии малоградиентного поля.

Скорость смещения циклонов, при которых наблюдались сильные ливни, изменялась от 4 до 30 км/ч. Среднее значение составило 19 км/ч, что практически совпадает со средней скоростью циклонов в случаях, когда отмечались очень сильные дожди. На рис. 4а показано распределение числа случаев сильных ливней в зависимости от скорости смещения циклона.

Метеорология
Калинин Н.А.

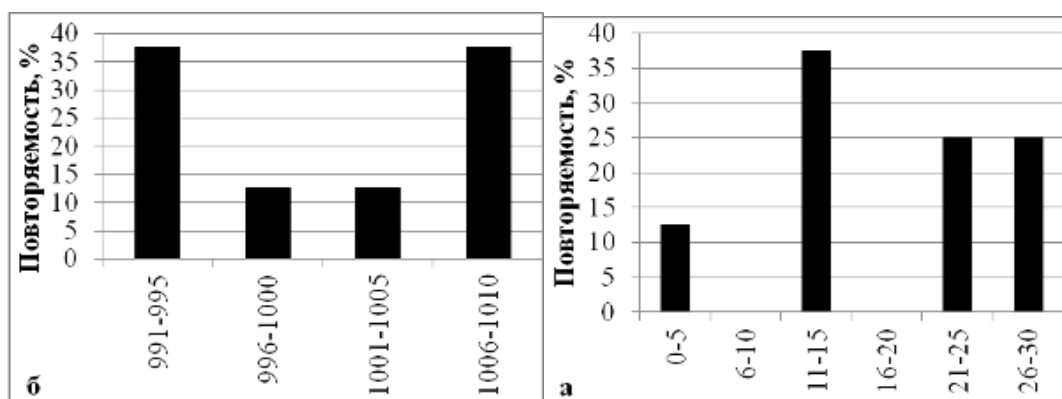


Рис. 4. Распределение (%) числа случаев сильных ливней в зависимости от:

а – скорости смещения циклонов, км/ч; б – глубины циклонов, гПа

Fig. 4. Distribution (%) of heavy downpour cases depending on: the cyclone displacement speed, km/h (a); the cyclone depth, hPa (b)

Среднее значение глубины циклонов, при которых наблюдаются сильные ливни, составляет 1000,0 гПа. Минимальное и максимальное значения равны соответственно 992,0 и 1008,0 гПа. На рис. 4б представлено распределение числа случаев сильных ливней в зависимости от глубины циклона.

Данные о стадиях развития циклонов показали, что наибольшее число случаев сильных ливней отмечается в молодых циклонах, а также в циклонах, находящихся на стадии заполнения (по 50%).

Наконец, на рис. 5 показано распределение числа случаев сильных ливней в зависимости от диаметра и площади циклона.

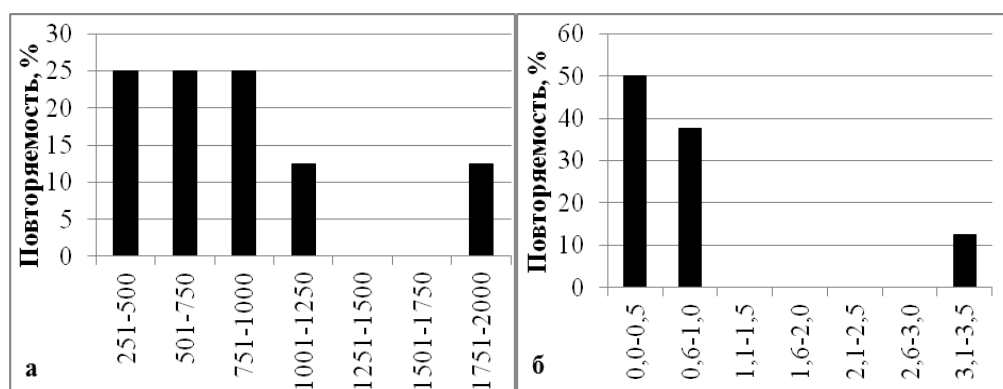


Рис. 5. Распределение (%) числа случаев сильных ливней в зависимости от:

а – диаметра циклонов, км; б – площади циклонов, млн км²

Fig. 5. Distribution (%) of heavy downpour cases depending on: the cyclone diameter, km (a); the cyclone area, million km² (b)

Расчет индексов неустойчивости в дни с сильными осадками позволил выявить следующие закономерности. На рис. 6 представлена диаграмма повторяемости значений индексов Thomson index (а), SRH255 (б), MCS (в) и K-index (г) в дневные и ночные сроки, из которой следует, что очень сильные дожди с большой долей вероятности будут выпадать при значениях индексов, изменяющихся в пределах соответственно 31–40 (повторяемость около 60%), 1–100 (повторяемость 75%), от –3,9 до –2,0 (повторяемость 65%) и 31–35 с повторяемостью 40% в ночные часы и около 50% в дневные.

Метеорология
Калинин Н.А.

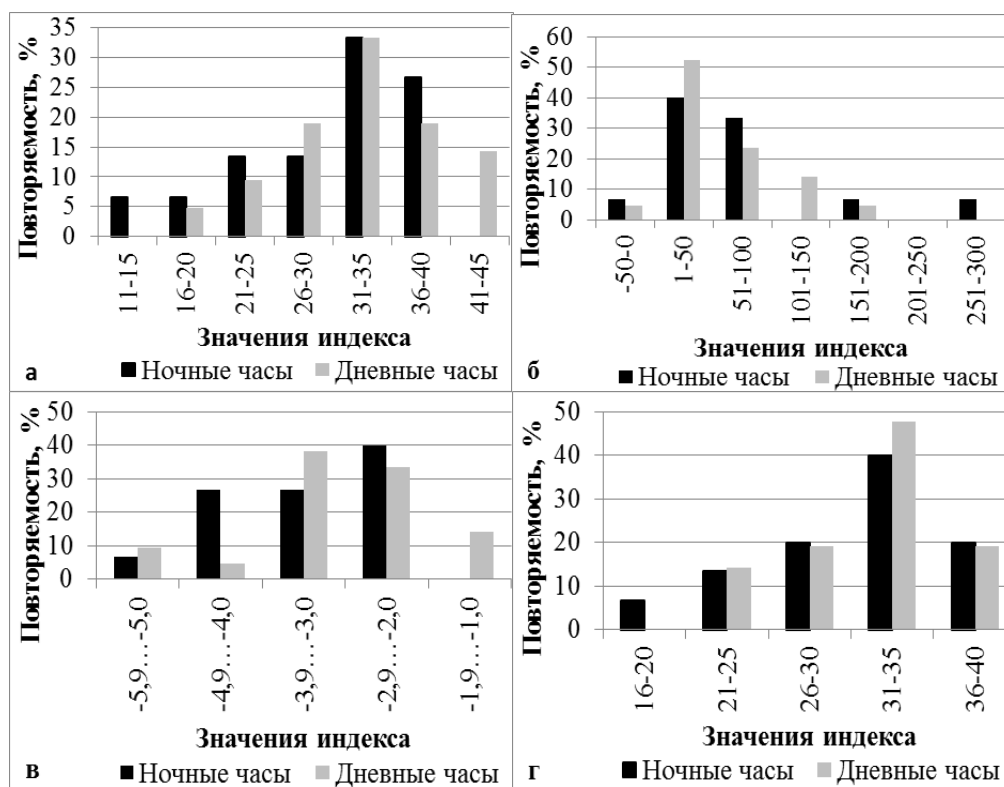


Рис. 6. Повторяемость значений: а – Thomson index; б – SRH255; в – MCS; г – K-index в случае очень сильных дождей на территории Уральского Прикамья за 1979–2015 гг.
Fig. 6. Repeatability of the values of Thomson index (a), SRH255 (b), MCS (c), and K-index (d) in case of very heavy rains in Ural Prikamye for 1979–2015

Расчет следующей группы индексов (Lifted index, EPI, PW и CIN), представленный на рис. 7 показал, что очень сильные дожди с большой долей вероятности будут выпадать при значениях индексов, изменяющихся в пределах от $-3,9$ до $-2,0$ (повторяемость 27%) в дневные часы и от $0,1$ до $2,0$ (повторяемость 33%) в ночные часы для Lifted index, от $5,1$ до $7,5$ в ночное время (повторяемость 47%) и в интервале значений $0,1-2,5$ в дневное время (повторяемость 43%) для EPI, в диапазоне от 26 до 35 (более 33% как ночью, так и днем) для PW и от -24 до 0 (повторяемость более 60%) для индекса CIN.

Наконец, из рис. 8 следует, что с вероятностью 80% для ночных сроков значения CAPE255 находятся в диапазоне от 0 до 500. Дневные сроки относятся к тому же диапазону, но повторяемость этих значений ниже (43%). Характер распределения индекса CAPE аналогичный.

Сильные ливни интенсивностью ≥ 30 мм/ч связаны с развитием конвекции, имеют локальный характер и поэтому часто пропускаются сетью наблюдений. За период 1979–2015 гг. зафиксировано всего 14 случаев сильного ливня в градации ОЯ. При таком объеме выборки разбивка на дневные и ночные сроки нецелесообразна.

Возникновение конвективных ОЯ обусловлено взаимодействием крупномасштабных (синоптических) и мезомасштабных процессов. Развитию интенсивной конвекции способствуют крупномасштабные упорядоченные восходящие движения; сходимости потоков в нижней тропосфере и расходимость в верхней тропосфере; вынужденный подъем воздуха, обусловленный прохождением фронтальных разделов; высокая температура и влагосодержание в пограничном слое тропосферы, значительное влагосодержание в средней тропосфере; вертикальные градиенты температуры, превышающие влажноадиабатический. На рис. 9а представлена диаграмма значений Thomson index, наибольшая повторяемость которого наблюдается при значениях от 26 до 35 (по 33% случаев в каждом интервале). В остальных случаях повторяемость значений по каждому диапазону не превышает 11%. Индекс SRH255 характеризует завихренность и сдвиг ветра в приземном слое атмосферы (рис. 9б). Значения индекса, при которых наблюдается сильный ливень, колеблются от 1 до 150. Наибольшую повторяемость имеют значения от 1 до 100 (88% случаев). Относительно

Метеорология
Калинин Н.А.

индекса MCS можно отметить, что наибольшая повторяемость сильных ливней наблюдается в диапазоне от $-2,9$ до $-2,0$ (56%). Как выше, так и ниже этих значений происходит резкое снижение повторяемости сильных ливней (рис. 9в).

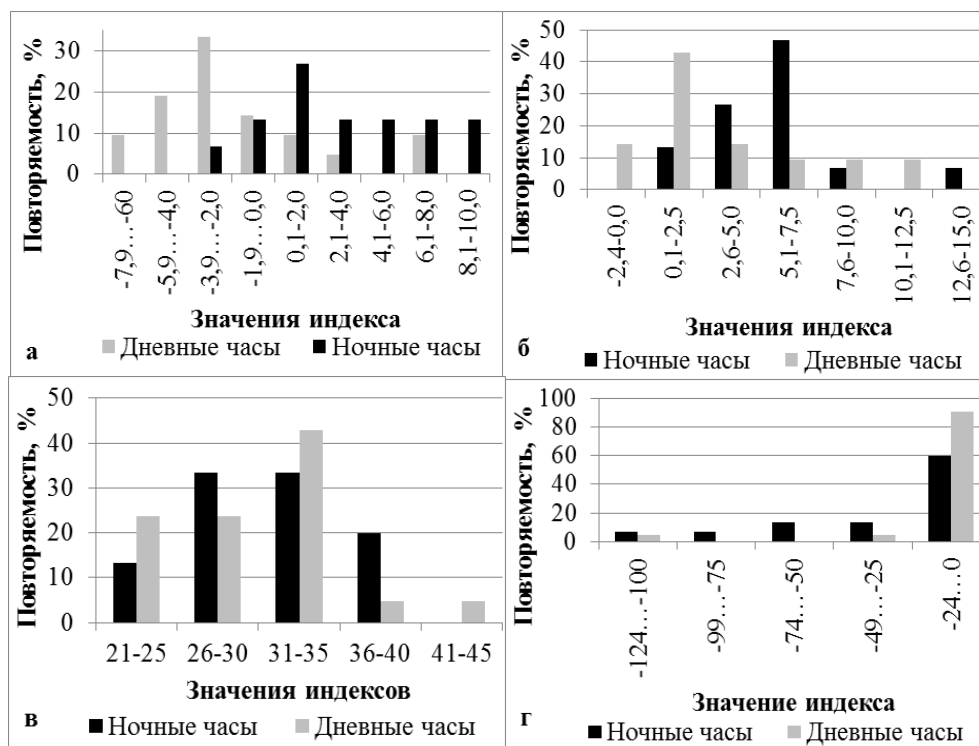


Рис. 7. Повторяемость значений: а – Lifted index; б – EPI; в – PW; г – CIN в случае очень сильных дождей на территории Уральского Прикамья за 1979–2015 гг.
Fig. 7. Repeatability of the values of Lifted index (a), EPI (b), PW (c) and CIN (d) in case of very heavy rains in Ural Prikamye for 1979–2015

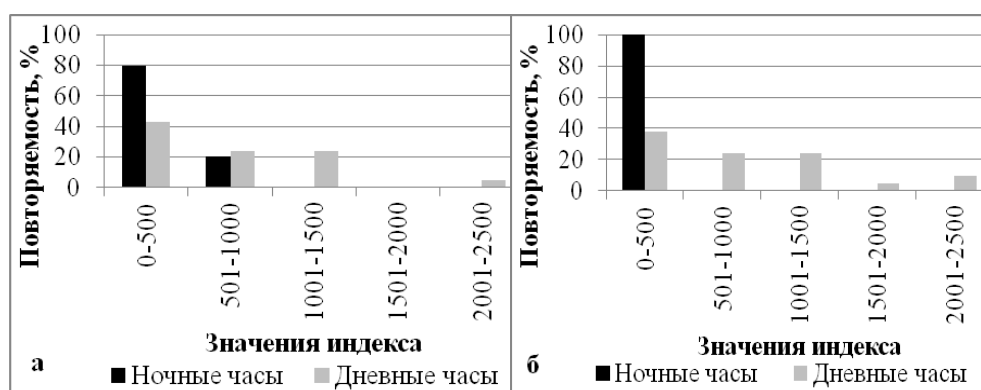


Рис. 8. Повторяемость значений индексов: а – CAPE255; б – CAPE в случае очень сильных дождей на территории Уральского Прикамья за 1979–2015 гг.
Fig. 8. Repeatability of the values of CAPE255 (a) and CAPE (b) indices in case of very heavy rains in Ural Prikamye for 1979–2015

Метеорология
Калинин Н.А.

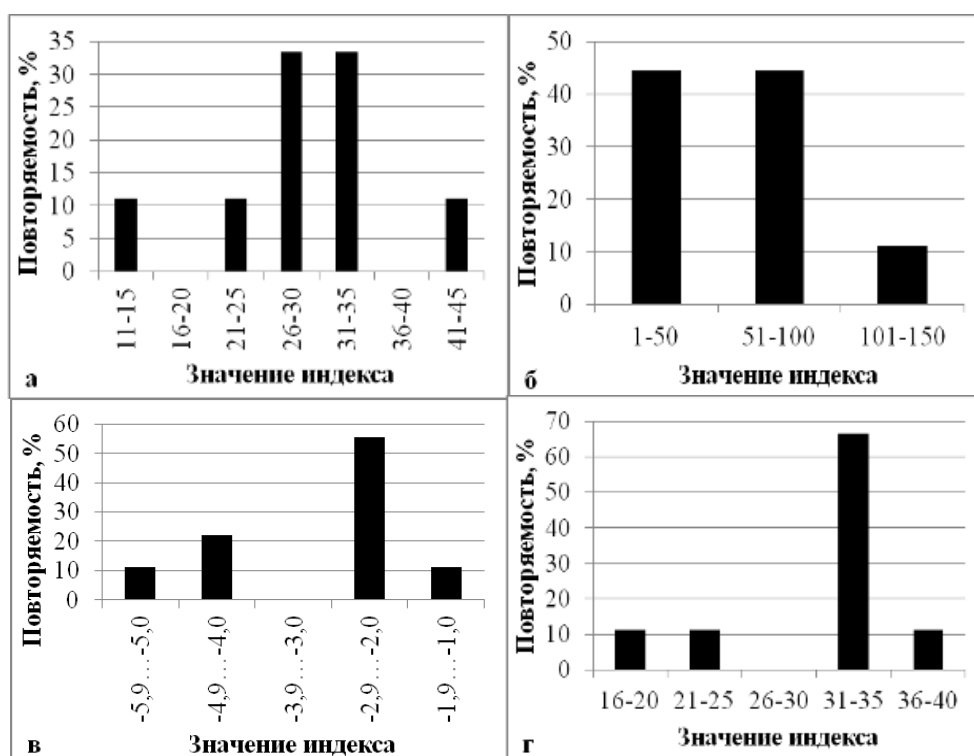


Рис. 9. Повторяемость значений: а – Thomson index; б – SRH255; в – MCS; г – K-index в случае сильных ливней на территории Уральского Прикамья за 1979–2015 гг.
Fig. 9. Repeatability of the values of Thomson index (a), SRH255 (b), MCS (c), and K-index (d) in case of heavy downpours in Ural Prikamye for 1979–2015

Из анализа изменчивости K-index следует, что наибольшую повторяемость имеют значения от 31 до 35 (67% всех случаев). В остальных же случаях повторяемость K-index при сильных ливнях не превышает 11% (рис. 9г).

В случаях с сильными ливнями значения Lifted index изменяются в широком диапазоне: от $-4,9$ до $7,5$ (рис. 10а). При этом в 11% случаев сильные ливни наблюдались при устойчивом состоянии атмосферы, в 33% случаев наблюдалась небольшая устойчивость, а в 55% случаев сильный ливень был зарегистрирован при наличии умеренной неустойчивости. В 11% случаев отмечалась сильная неустойчивость. На рис. 10б представлена диаграмма повторяемости значений индекса EPI, наибольшая повторяемость которого лежит в пределах от $-2,4$ до $5,0$ (78%). Индекс PW характеризует запас влаги в атмосфере (рис. 10в). В дни, когда наблюдались сильные ливни, с большей вероятностью были зафиксированы значения индекса в диапазоне от 26 до 35 (88%). Значения индекса CIN свидетельствуют о наличии задерживающего слоя в атмосфере. Чем больше величина индекса по модулю, тем мощнее устойчивый слой. Из рис. 10г следует, что с вероятностью более 56% случаи с сильными ливнями на территории Уральского Прикамья наблюдаются при значениях индекса в интервале от -24 до 0. В целом этот индекс нужно рассматривать в комплексе с другими параметрами, например, с индексом CAPE, так как сам по себе индекс CIN не информативен.

Индекс CAPE характеризует доступную конвективную потенциальную энергию. Чем выше значения данного индекса, тем мощнее конвекция. Анализируя повторяемость индекса CAPE180 (рис. 11а), приходим к выводу о том, что с вероятностью 67% его значения находятся в диапазоне от 0 до 250, что характеризуется слабой неустойчивостью атмосферы. С повторяемостью 22% встречаются значения индекса от 750 до 1000, что также характеризуется слабой неустойчивостью. На рис. 11б представлена гистограмма повторяемости индекса CAPE. Его характер распределения аналогичен CAPE180.

Метеорология
Калинин Н.А.

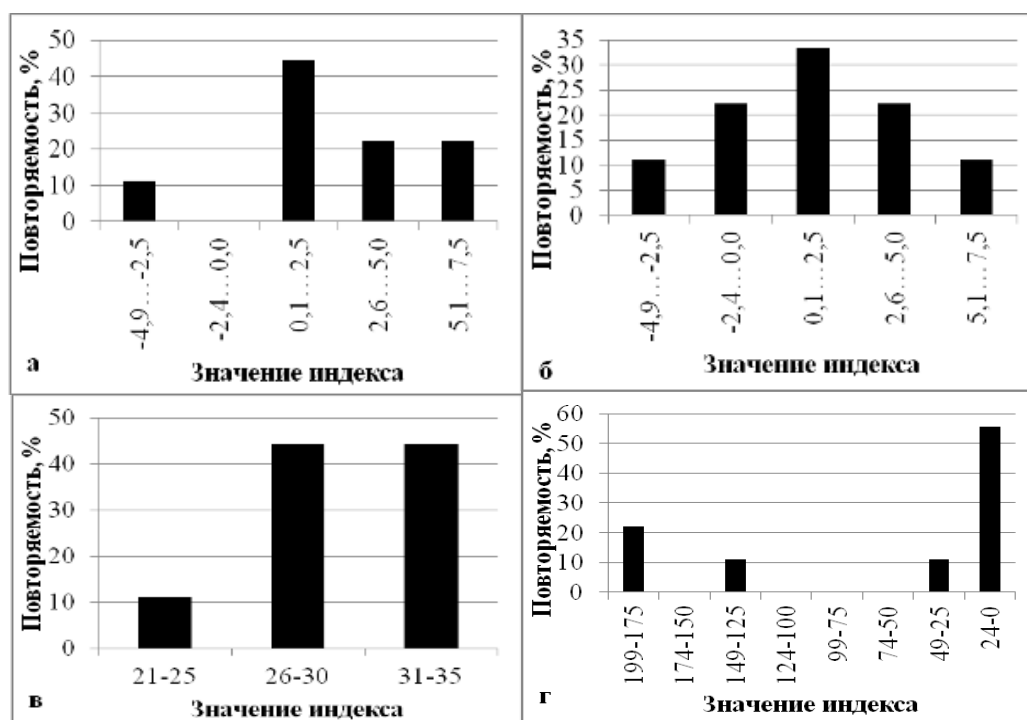


Рис. 10. Повторяемость значений: а – Lifted index; б – EPI; в – PW; г – CIN в случае сильных ливней на территории Уральского Прикамья за 1979–2015 гг.

Fig. 10. Repeatability of the values of Lifted index (a), EPI (b), PW (c) and CIN (d) in case of heavy downpours in Ural Prikamye for 1979–2015

В заключительной части работы рассмотрим возможность прогноза сильных осадков на территории Уральского Прикамья с помощью индексов неустойчивости атмосферы. Расчет парных коэффициентов корреляции выявил наличие линейной связи между общим количеством выпавших осадков и значениями индексов неустойчивости атмосферы.

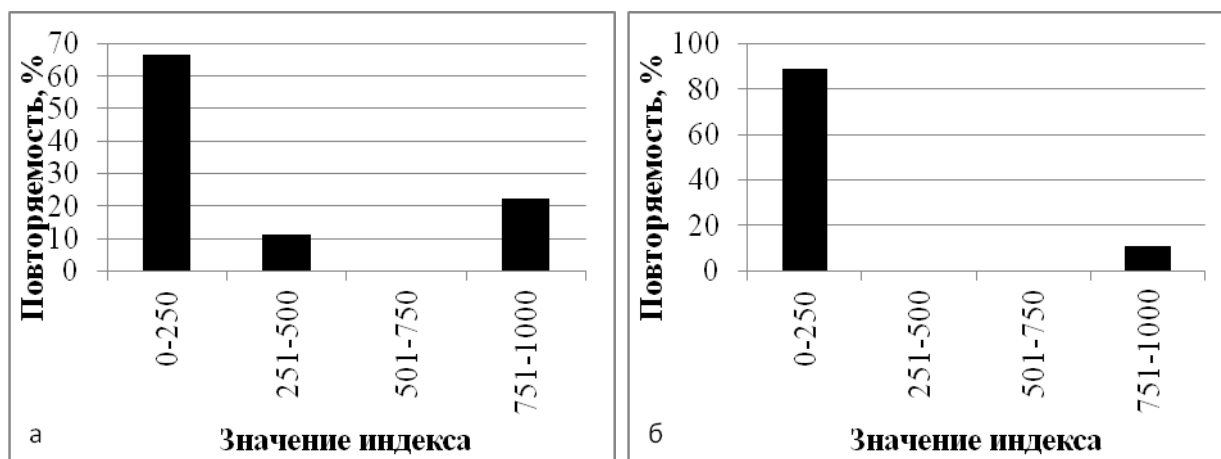


Рис. 11. Повторяемость значений индексов: а – CAPE180; б – CAPE в случае сильных ливней на территории Уральского Прикамья за 1979–2015 гг.

Fig. 11. Repeatability of the values of CAPE180 (a) and CAPE (b) indices in case of heavy downpours in Ural Prikamye for 1979–2015

Метеорология
Калинин Н.А.

Таблица 1

Оправдываемость прогноза наличия или отсутствия очень сильного дождя при заданных интервалах значений предикторов
Accuracy of forecasting the presence or absence of very heavy rain at specified ranges of predictor values

№ п/п	Группа предикторов	Интервал значений	Характеристика оправдываемости прогноза					
			Ac_G	Ac	W	Ac_{no}	W_{no}	T
1	MCS	-5,9...-2,3	0,78	0,72	0,67	0,81	0,85	0,52
	Ti	24...43						
2	MCS	-5,9...-2,3	0,78	0,69	0,68	0,83	0,84	0,51
	SRH255	-22...92						
3	MCS	-5,9...-2,3	0,77	0,81	0,63	0,75	0,88	0,51
	PW	21...40						

Таблица 2

Оценка качества прогноза количества осадков
Assessment of precipitation forecast quality

№ п/п	Вид уравнения	Оправдываемость прогноза, %
1	$Z = 1,150 \cdot MCS - 0,332 \cdot Ti + 73,532$	66
2	$Z = 1,562 \cdot MCS - 0,030 \cdot SRH255 + 68,437$	65
3	$Z = 1,562 \cdot MCS - 0,598 \cdot PW + 80,826$	64

Таблица 3

Оправдываемость прогноза наличия или отсутствия сильного ливня при заданных интервалах значений предикторов
Accuracy of forecasting the presence or absence of heavy downpour at specified ranges of predictor values

Группа предикторов	Интервал значений	Характеристика оправдываемости прогноза					
		Ac_G	Ac	W	Ac_{no}	W_{no}	T
Li	0,3...5,1	0,92	0,78	0,54	0,94	0,98	0,52
EPI	-3,4...3,2						

Таблица 4

Оценка качества прогноза количества выпавших осадков
Assessment of the precipitation forecast quality

№ п/п	Вид уравнения	Оправдываемость прогноза, %
1	$Z = 2,781 \cdot EPI - 1,168 \cdot Li + 41,382$	59

Для получения наиболее точного прогноза целесообразно использовать одновременно несколько предикторов. В табл. 1 представлены наилучшие результаты по прогнозу очень сильного дождя с использованием трех пар предикторов. В целом все три группы предикторов имеют почти одинаковые результаты расчета оправдываемости очень сильного дождя. Интенсивность явления, т.е. количество выпавших осадков, рассчитывалось по следующей формуле:

$$Z = A \cdot X + B \cdot Y + C,$$

где Z – расчетное количество осадков, мм или $кг/м^2$; A и B – коэффициенты при предикторах X и Y из табл. 1; C – свободный коэффициент.

*Метеорология**Калинин Н.А.*

Оценка качества прогноза количества осадков производилась с использованием Наставления [8]. Результаты, представленные в табл. 2, свидетельствуют о том, что в целом удалось получить удовлетворительный результат.

Аналогичные расчеты по прогнозу сильного ливня представлены в табл. 3–4, из которых следует, что оправдываемость прогнозов сильных ливней не превышает 60%. Тем не менее данный подход возможно применять на практике с целью оценки степени вероятности опасного явления.

Заключение

Комплексный статистический анализ данных о характеристиках циклонов, с которыми связаны очень сильные дожди в Уральском Прикамье, показал, что в 87% случаев очень сильные дожди связаны с влиянием циклонов, остальные 13% случаев приходятся на малоградиентные поля и периферии антициклонов.

Наибольшее число случаев очень сильных дождей обусловлено влиянием южных и западных циклонов. Среднее значение скорости смещения рассматриваемых циклонов составило 18 км/ч.

Изучение влияния стадии развития циклона на формирование сильных дождей позволило выяснить, что наибольший вклад вносят молодые циклоны, а также циклоны на стадии заполнения. Преобладают хорошо развитые по вертикали циклоны, которые прослеживаются до поверхности 300 гПа и выше. Средняя глубина циклона составила 999,7 гПа.

Исследование геометрических характеристик циклонов, с которыми связаны очень сильные дожди, позволило определить, что средние диаметр и площадь таких циклонов составляют 800 км и 0,60 млн км² соответственно.

Анализ временного распределения числа случаев очень сильных дождей за 1979–2015 гг. показал, что в течение рассматриваемого периода отмечается возрастание числа случаев очень сильных дождей в среднем от 1,6 до 3,5 случаев в год.

Применение индексов неустойчивости атмосферы на территории Уральского Прикамья для прогноза очень сильных осадков является возможным. Для прогноза целесообразно использовать индексы MCS, Ti, SRH255 и PW, с применением которых оправдываемость наличия или отсутствия явления составляет 78%, а количественный прогноз с помощью уравнений регрессии имеет оправдываемость около 65%.

Комплексный анализ данных о характеристиках циклонов, с которыми связаны очень сильные ливни в Уральском Прикамье, показал, что в 75% случаев очень сильные ливни обусловлены влиянием циклонов, остальные 25% случаев приходятся на малоградиентные поля и периферии антициклонов.

Наибольшее число случаев очень сильных ливней связано с влиянием южных и юго-западных циклонов. Преобладающими направлениями смещения циклонов являются северное либо северо-восточное направления. Среднее значение скорости смещения рассматриваемых циклонов составило 19 км/ч.

При изучении влияния стадии развития циклона на формирование сильных ливней выяснилось, что наибольший вклад вносят молодые циклоны, а также циклоны на стадии заполнения. Преобладают хорошо развитые по вертикали циклоны, которые прослеживаются до поверхности 500 гПа и выше. Средняя глубина циклона составила 1000,0 гПа.

Исследование геометрических характеристик циклонов, с которыми связаны сильные ливни, показало, что средние диаметр и площадь таких циклонов составляют 880 км и 0,80 млн км² соответственно.

Кроме того, анализ временного распределения числа случаев сильных ливней за 1979–2015 гг. позволил определить, что за исследуемый период число случаев сильных ливней не изменялось, в среднем они появляются раз в 2–3 года.

Применение индексов неустойчивости атмосферы на территории Уральского Прикамья для прогноза сильных ливней является возможным. Для прогноза целесообразно использовать индексы Li и EPI. С применением данных индексов оправдываемость наличия или отсутствия явления составляет 92%, а количественный прогноз с помощью уравнений регрессии имеет оправдываемость 59%.

Автор выражает благодарность В.Е. Тиуну за помощь в проведении расчетов.

Метеорология

Калинин Н.А.

Библиографический список

1. Алексеева А.А. Подходы к решению проблемы прогнозирования сильных летних осадков // Труды Гидрометцентра России. 2014. Вып. 351. С. 51–67.
2. Быков А.В., Ветров А.Л., Калинин Н.А. Прогноз опасных конвективных явлений в Пермском крае с использованием глобальных прогностических моделей // Труды Гидрометцентра России. 2017. Вып. 363. С. 101–119.
3. Калинин Н.А. Мониторинг, моделирование и прогноз состояния атмосферы в умеренных широтах. Пермь, 2015. 308 с.
4. Калинин Н.А., Ермакова Л.Н., Аликина И.Я. Особенности формирования высокой температуры воздуха в сентябре – октябре 2003 г. на Среднем и Южном Урале // Метеорология и гидрология. 2005. № 5. С. 82–89.
5. Калинин Н.А., Кислов А.В., Бабина Е.Д., Ветров А.Л. Оценка качества воспроизведения моделью MM5 температуры воздуха в июле на Урале // Метеорология и гидрология. 2010. № 10. С. 15–22.
6. Калинин Н.А., Фрик Л.В., Смирнова А.А. Исследование влияния рельефа Пермского края на распределение полей осадков // Географический вестник. 2008. № 2(8). С. 187–195.
7. Калинин Н.А., Шихов А.Н., Быков А.В. Прогноз мезомасштабных конвективных систем на Урале с помощью модели WRF и данных дистанционного зондирования // Метеорология и гидрология. 2017. № 1. С. 16–28.
8. Наставление по краткосрочным прогнозам погоды общего назначения. Федеральная служба по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (Росгидромет). Обнинск: ИГ-СОЦИН, 2009. 62 с.
9. 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. No 3. P. 1–14.
10. George J.J. *Weather Forecasting for Aeronautics*. New York and London Academic Press. 1960. 673 p.
11. Jurgen Gracier. Convection parameters. URL: <http://www.juergengrieser.de/ConvectionParameters/ConvectionParameters.pdf> (дата обращения: 24.09.2019).
12. Miller R.C. Notes on analysis and severe storm forecasting procedures of the Air Force Global Weather Center. Tech. Rept. 200(Rev). Headquarters, Air Weather Service, USAF, 1972. 190 p.
13. Rasmussen E.N., Blanchard D.O. A baseline climatology of sounding-derived supercell and tornado forecast parameters // *Wea. Forecasting*. 1998. Vol. 13. P. 1148–1164.
14. Schulz P. Relationships of several stability indices to convective weather events in northeast Colorado // *Wea. Forecasting*. 1989. Vol. 4. P. 73–80.
15. Thompson R.L., Edwards R., Hart J.A., Elmore K.L., Markowski P. Close proximity soundings within supercell environments obtained from the Rapid Update Cycle // *Wea. Forecasting*. 2003. Vol. 18. P. 1243–1261.

References

1. Alekseeva, A.A. (2014), “Approaches to solving the problem of forecasting heavy summer precipitation”, *Proceedings of Hydrometeorological center of Russia*, no. 351, pp. 51–67.
2. Bykov, A.V., Vetrov, A.L., Kalinin, N.A. (2017), “Prediction of dangerous convective phenomena in Perm region using global prognostic models”, *Proceedings of Hydrometeorological center of Russia*, no. 363, pp. 101–119.
3. Kalinin, N.A. (2015), *Monitoring, modelirovanie i prognoz sostoyaniya atmosfery v umerennykh shirotakh* [Monitoring, modeling and forecast of the state of atmosphere in midlatitudes]. Perm State University, Perm, Russia.
4. Kalinin, N.A., Ermakova, L.N., Alikina, I.Ya. (2005), “Features of formation of high air temperature in September-October 2003 in Middle and South Ural”, *Russian Meteorology and Hydrology*, no. 5, pp. 82–89.
5. Kalinin, N.A., Kislov, A.V., Babina, E.D., Vetrov, A.L. (2010), “Estimation of air temperature reproduction quality by the MM5 model in the Urals in July”, *Russian Meteorology and Hydrology*, no.10, pp. 15–22.
6. Kalinin, N.A., Frik, L.V., Smirnova, A.A. (2008), “Study of the impact of the relief of Perm region on the distribution of precipitation fields”, *Geographical bulletin*, no. 2(8), pp. 187–195.
7. Kalinin, N.A., Shikhov, A.N., Bykov, A.V. (2017), “Forecasting mesoscale convective systems in the Urals using the WRF model and remote sensing data”, *Russian Meteorology and Hydrology*, no. 1, pp. 16–28.
8. *Nastavlenie po kratkosrochnym prognozam pogody obshchego naznacheniya* (2009), [Manual on near-term weather forecasts of general purpose]. Federal Service for Hydrometeorology and Environmental Monitoring (Roshydromet), IS-SOTsIN, Obninsk, Russia.
9. Doswell, C.A. and Shultz, D.M. (2006), “On the use of indices and parameters in forecasting severe storms”, *Electronic J. Severe Storms Meteorology*, vol. 1, no. 3, pp. 1–14.
10. George, J.J. (1960), *Weather Forecasting for Aeronautics*, New York and London Academic Press, USA, UK.
11. Jurgen, G. (2012), “Convection parameters”, available at: <http://www.juergengrieser.de/ConvectionParameters/ConvectionParameters.pdf> (Accessed 24 September 2019).
12. Miller, R.C. (1972), “Notes on analysis and severe storm forecasting procedures of the Air Force Global Weather Center”, Tech. Report 200(Rev), Air Weather Service (MAC), Scott AFB, IL.

*Метеорология**Калинин Н.А.*

13. Rasmussen, E.N. and Blanchard, D.O. (1998), "A baseline climatology of sounding-derived supercell and tornado forecast parameters", *Wea. Forecasting*, vol. 13, pp. 1148–1164.

14. Schulz, P. (1989), "Relationships of several stability indices to convective weather events in northeast Colorado", *Wea. Forecasting*, vol. 4, pp. 73–80.

15. Thompson, R.L., Edwards, R., Hart, J.A., Elmore, K.L., Markowski, P. (2003), "Close proximity soundings within supercell environments obtained from the Rapid Update Cycle", *Wea. Forecasting*, vol. 18, pp. 1243–1261.

Поступила в редакцию: 22.10.2019

Сведения об авторе**Калинин Николай Александрович**

доктор географических наук, профессор, заведующий кафедрой метеорологии и охраны атмосферы Пермского государственного национального исследовательского университета; Россия, 614990, г. Пермь, ул. Букирева, 15

About the author**Nikolay A. Kalinin**

Doctor of Geographical Sciences, Professor, Head of the Department of Meteorology and Atmosphere Protection, Perm State University; 15, Bukireva st., Perm, 614990, Russia;

Просьба ссылаться на эту статью в русскоязычных источниках следующим образом:

Калинин Н.А. Условия формирования и прогноз сильных осадков с помощью индексов неустойчивости атмосферы на территории Уральского Прикамья // Географический вестник = Geographical bulletin. 2019. №4(51). С. 96–112. doi 10.17072/2079-7877-2019-4-96-112.

Please cite this article in English as:

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 // Geographical bulletin. 2019. №4(51). Pp. 96–112. doi 10.17072/2079-7877-2019-4-96-112.