

УДК 551.509.54

Особенности термодинамического состояния атмосферы при сильных осадках на территории Пермского края

Б.А. Сивков, Н.А. Калинин

*Пермский государственный национальный исследовательский
университет, г. Пермь, Россия
meteo@psu.ru*

В работе рассмотрены индексы неустойчивости атмосферы и их значения, которые характеризуют термодинамическое состояние атмосферы при выпадении сильных осадков (≥ 50 мм/12ч или ≥ 30 мм/1ч) в зависимости от синоптической ситуации, типа выпадающих осадков, а также их продолжительности. Исследование проведено для территории Пермского края на основе данных за 1979–2018 гг. Для исследования были выбраны индексы неустойчивости, основанные на методе частицы (CAPE, LI и CIN), температурно-влажностных характеристиках атмосферы (K, TQ, индекс Фатеева), а также индексы, учитывающие оба этих фактора (DCI и TI). Проведенный анализ показал, что чаще всего сильные осадки связаны с прохождением фронтов окклюзии и холодных фронтов. При этом на холодных фронтах преобладают более высокие значения индексов. Разделение осадков в зависимости от физических условий образования показало, что ливневым осадкам соответствуют более высокие значения индексов CAPE, LI и CIN, в то время как индексы K, TQ, Фатеева, DCI и TI имеют близкие значения как при ливневых, так и при обложных и смешанных осадках.

Ключевые слова: сильные осадки, индексы неустойчивости, реанализ CFS, Пермский край

DOI: <https://doi.org/10.37162/2618-9631-2020-1-83-95>

Peculiarities of the thermodynamic state of the atmosphere under heavy precipitation in the Perm region

B.A. Sivkov, N.A. Kalinin

*Perm State University, Perm, Russia
meteo@psu.ru*

The paper considers the indices of atmospheric instability and their values, which characterize the thermodynamic state of the atmosphere during heavy precipitation (≥ 50 mm/12 hours or ≥ 30 mm/1 hour) depending on the synoptic conditions, the precipitation type, and its duration. The study is performed for the territory of the Perm region based on data for 1979–2018. The indices based on the particle method (CAPE, LI, and CIN), temperature and humidity characteristics of the atmosphere (K, TQ, Fateev index), as well as the indices taking into account both these factors (DCI and TI) are chosen for the study. The analysis revealed that heavy precipitation is most often associated with the movement of occlusion fronts and cold fronts. The higher values of indices predominate on the cold fronts. The discrimination of precipitation depending on the physical

formation conditions showed that shower-type precipitation corresponds to the higher values of CAPE, LI, and CIN indices, while the K, TQ, Fateev, DCI, and TI indices have similar values for both shower-type and widespread precipitation.

Keywords: heavy precipitation, instability indices, CFS reanalysis, Perm region

Введение

Сильные осадки относят к опасным метеорологическим явлениям (ОЯ) вследствие их разрушительной силы. В зависимости от их интенсивности и продолжительности они могут привести к разнообразным неблагоприятным последствиям. Сильные осадки являются одной из причин возникновения наводнений, оползней, селей, размывания берегов и т. д. В сельском хозяйстве очень сильные и продолжительные осадки приводят к смыву почвы, разрушению сельскохозяйственных угодий, вымоканию урожая, полеганию зерновых в период уборки. Поэтому точный и заблаговременный прогноз возникновения сильных осадков и их количества является актуальной задачей, а значит, актуальным является и исследование условий их образования.

Согласно [9], 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. Согласно [8], в Пермском крае в ливнеопасных районах располагаются 5 метеостанций из 25: Вая, Губаха, Бисер, Кунгур и Кын.

Как известно, в образовании осадков принимают участие два основных процесса: конденсация водяного пара на начальном этапе и дальнейшее укрупнение облачных элементов за счет коагуляции [1, 6]. Особо важную роль в образовании осадков играют вертикальные движения. В первую очередь восходящие движения обеспечивают понижение температуры воздуха, благодаря которому в атмосфере наблюдается перенасыщение водяного пара и рост капель за счет конденсации. Во-вторых, капли, поднимаемые восходящими потоками в более высокие слои атмосферы, при падении должны пройти значительную толщу облака, благодаря чему они увеличиваются в размерах за счет коагуляции. Чем интенсивнее восходящие потоки, тем на большую высоту смогут подняться облачные элементы.

Другим важным фактором образования осадков является влагосодержание. При его низких значениях образуются осадки слабой интенсивности и/или они имеют кратковременный характер [5]. Таким образом, для образования сильных осадков необходимы два условия: высокое влагосодержание и интенсивные восходящие вертикальные движения.

Для оценки возможности развития ОЯ, в том числе сильных осадков, метеорологами были разработаны параметры неустойчивости атмосферы [10]. Для характеристики вертикальных движений используются параметры, основанные на методе частицы: доступная потенциальная

энергия неустойчивости CAPE, параметр плавучести LI и энергия конвективного торможения CIN. Для определения условий увлажнения применяются параметры, в основе которых лежат температурно-влажностные характеристики: индекс Вайтинга (K), индекс Н.П. Фатеева (A), TQ Index и др. Кроме того, применяются параметры для комплексного учета обоих факторов: индекс глубокой конвекции (DCI), индекс Томпсона (TI) и др.

Целью данного исследования является выявление особенностей термодинамического состояния атмосферы в период выпадения сильных осадков на территории Пермского края с помощью перечисленных выше индексов неустойчивости атмосферы.

Методика исследования

Исследования проведены на основе использования информации о датах, когда наблюдалось опасное явление (осадки градации ОЯ) в период с 1979 по 2018 г., данных реанализа модели CFS (Climate Forecasting System) в сроки 0, 6, 12, 18 ч ВСВ, архива синоптических карт в программном комплексе ГИС Метео и данных метеостанций о наблюдаемых явлениях и их продолжительности.

Набор доступных переменных в данных реанализа уже включает в себя поля индексов CAPE, CIN и LI, рассчитываемых по формулам (1) – (3) Индексы K, Н.П. Фатеева, TQ Index, DCI, TI рассчитывались по данным реанализа с помощью программного пакета OpenGraDS по формулам (4) – (8).

CAPE (convective available potential energy) – доступная потенциальная энергия конвекции, Дж/кг («энергия неустойчивости») [10]:

$$\text{CAPE} = g \int_{LFC}^{EL} \frac{T'_p - T'}{T'} dz, \quad (1)$$

где g – ускорение свободного падения; T'_p , T' – виртуальная температура на уровне p в поднимающейся частице и в окружающем воздухе соответственно; LFC – уровень конденсации; EL – уровень конвекции.

Значениям CAPE от 0 до 1000 Дж/кг соответствует слабая неустойчивость атмосферы. При этом вероятны слабые ливневые осадки. При значениях 1000–2500 Дж/кг отмечается умеренная неустойчивость с ливнями, грозами и шквалами. Значениям CAPE, равным 2500–3500 Дж/кг, соответствует сильная неустойчивость, при значениях свыше 3500 Дж/кг – очень сильная неустойчивость с сильными и очень сильными грозами, шквалами и градом.

CIN (Convective inhibition) – энергия конвективного торможения, Дж/кг [10]. Это количество энергии, необходимое частице воздуха для преодоления в нижней тропосфере задерживающего слоя:

$$\text{CIN} = g \int_0^{LFC} \frac{T'_p - T'}{T'} dz. \quad (2)$$

Значениям CIN в диапазоне $-50 - 0$ Дж/кг соответствует слабая устойчивость атмосферы, но при этом возможна конвекция. При CIN, равной $-200 - -50$ Дж/кг, наблюдается умеренная устойчивость, а при значениях ниже -200 Дж/кг – сильная устойчивость, при которой конвекция невозможна.

LI (Lifted Index) – характеризует термическую стратификацию атмосферы по отношению к вертикальным перемещениям воздуха, °C [10], рассчитывается по формуле:

$$LI = T_{500} - T_{parsell} \quad (3)$$

где T_{500} – температура окружающей среды на изобарической поверхности 500 гПа, °C; $T_{parsell}$ – температура частицы на изобарической поверхности 500 гПа.

При значениях LI от 0 до -2 °C атмосфера является слабо неустойчивой; от -2 до -6 °C – умеренно неустойчивой; при значениях ниже -6 °C – сильно неустойчивой. При значениях индекса выше 0 °C атмосфера устойчива.

Индекс К (K Index) – характеризует совместное влияние стратификации температуры и содержания водяного пара, °C [10]:

$$K = (T_{850} - T_{500}) + Td_{850} - (T_{700} - Td_{700}), \quad (4)$$

где T_{500} , T_{700} , T_{850} – температура окружающей среды на изобарических поверхностях 500, 700 и 850 гПа, °C; Td_{850} , Td_{700} – температура точки росы на изобарических поверхностях 850 и 700 гПа, °C.

Значения K в диапазоне $25-30$ °C соответствуют слабо неустойчивой атмосфере; в диапазоне $30-35$ °C – умеренно неустойчивой; в диапазоне $35-40$ °C – сильно неустойчивой; свыше 40 °C – крайне неустойчивой атмосфере.

TQ Index – индекс для конвекции с низкой высотой верхней границы облачности. Используется также для оценки потенциала развития конвекции в средней тропосфере [11]:

$$TQ = T_{850} + Td_{850} - 1,7T_{700}, \quad (5)$$

где T_{850} , T_{700} – температура воздуха на изобарических поверхностях 850 и 700 гПа, °C; Td_{850} – температура точки росы на изобарической поверхности 850 гПа, °C. При значении индекса 12 °C может развиваться термическая и вынужденная конвекции, а при значениях 17 °C и более существуют условия для развития свободной конвекции.

Индекс Н.П. Фатеева (Индекс А) – представляет собой усовершенствованный индекс Вайтинга [2]:

$$A = T_{850} - T_{500} - \sum_{i=850,700,600,500} DD_i, \quad (6)$$

где DD_i – дефицит точки росы на изобарической поверхности i гПа, °С. Развитие конвекции ожидается при значениях индекса больше нуля.

Индекс глубокой конвекции (Deep Convective Index, DCI) объединяет в себе температуру воздуха T_{850} , °С, и точку росы Td_{850} , °С, на изобарической поверхности 850 гПа и Lifted Index [10]:

$$DCI = T_{850} + Td_{850} - LI. \quad (7)$$

При значениях DCI 30 °С и более ожидается развитие конвективных ОЯ.

Индекс Томпсона (Thompson Index, TI) рассчитывается по индексам K Index и Lifted Index [12]:

$$TI = K - LI. \quad (8)$$

При значении индекса 40 °С и более ожидается развитие конвективных ОЯ.

Выбор индексов основан на том, что они учитывают факторы, необходимые для образования сильных осадков (конвекцию и влагосодержание), а также на простоте их использования. Выбранные индексы можно легко рассчитать как по модельным данным, так и по данным температурно-ветрового зондирования атмосферы.

Рассчитанные поля индексов сохранялись в растровом формате GeoTIFF, который помимо информации о значениях индексов содержит метаданные об их географической привязке. Это позволяет проводить пространственный анализ в таких программах, как ArcGIS и QGIS.

Согласно [7], осадки измеряются два раза в сутки: в сроки 3 и 15 ч ВСВ. Индексы неустойчивости рассчитывались за 3 ч и за 6 ч до срока измерения осадков, далее из двух значений выбиралось максимальное.

Ввиду того, что сильные осадки, как правило, носят локальный характер, имеет смысл определять значения параметров неустойчивости не только в конкретной точке, но и в некотором радиусе от нее [3]. Это должно позволить избежать занижения значения индексов в случаях пространственной ошибки. Поэтому в данном исследовании также выбирались максимальные значения индексов в радиусе 50 км от станции, на которой было зафиксировано ОЯ. Для этого в программе QGIS для каждой метеостанции были построены буферные зоны с указанным выше радиусом, в пределах которых определялись максимальные значения индексов.

Результаты и их обсуждение

Всего за период с 1979 по 2018 год было зафиксировано 130 случаев с сильными осадками, из которых 11 случаев приходится на сильный ливень, а остальная часть – на очень сильный дождь, т. е. рассмотрены осадки градации ОЯ.

Выпадающие осадки могут достигнуть критериев ОЯ благодаря нескольким факторам: во-первых, при наличии интенсивной конвекции и значительного запаса водяного пара в атмосфере; во-вторых, из-за медленно перемещающихся фронтов и широкой полосы осадков. Как правило, с первым фактором связано выпадение кратковременных и интенсивных ливневых осадков, а со вторым – выпадение более продолжительных, но менее интенсивных обложных осадков. Кроме того, эти факторы могут действовать одновременно, поэтому актуальным является вопрос о том, каким типом осадков вызваны ОЯ на территории Пермского края, а также выявление зависимости величины параметров неустойчивости от этих типов.

В рамках данного исследования характер выпадающих осадков определялся по данным метеостанций. Эти данные содержат, в частности, информацию о явлениях, времени их начала и окончания, а также их интенсивности. Ливневые и обложные осадки кодируются цифрами 64 и 63 соответственно. Однако у этой информации есть доля субъективизма, так как визуально бывает трудно различить ливневой и обложной дождь. Такое может случиться, например, при маскировке конвективной облачности слоистообразной. Поэтому данную информацию об осадках необходимо анализировать более тщательно. Например, в случае, когда наблюдатель на протяжении 12 ч кодирует ливневой дождь постоянной интенсивности, что не характерно для данного типа осадков. Или, наоборот, закодированный обложной дождь часто меняет интенсивность от слабой до сильной и в целом имеет небольшую продолжительность. В таких ситуациях в рамках исследований считалось, что наблюдались осадки смешанного характера.

Характер осадков определялся только для случаев, которые были зарегистрированы в период с 1997 по 2018 г., ввиду отсутствия более ранних данных. Всего за это время наблюдалось 77 случаев с осадками градации ОЯ. Результаты анализа представлены на рис. 1.

Как видно из рис. 1, больше половины случаев с осадками градации ОЯ связаны с выпадением ливневых осадков (61 %), в 32 % случаев отмечались осадки смешанного типа и лишь 7 % случаев связаны с выпадением обложных осадков.

Кроме того, для каждого случая с сильным дождем (сильные ливни не учитывались) была посчитана продолжительность осадков. Распределение продолжительности представлено на рис. 2.

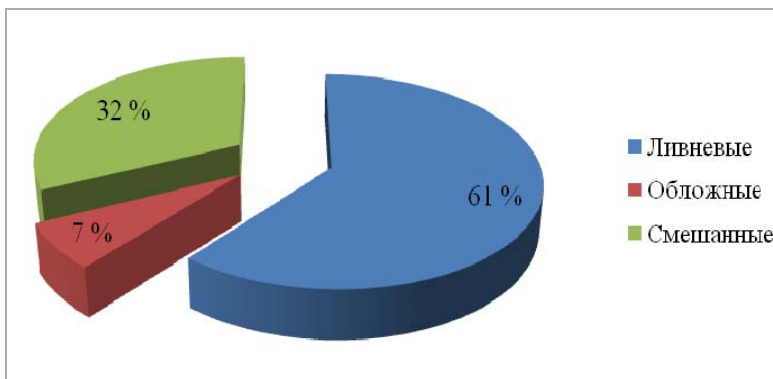


Рис. 1. Повторяемость (%) типов осадков, которые наблюдаются при опасном явлении.

Fig. 1 Repeatability (%) of precipitation types observed during the hazardous phenomenon.

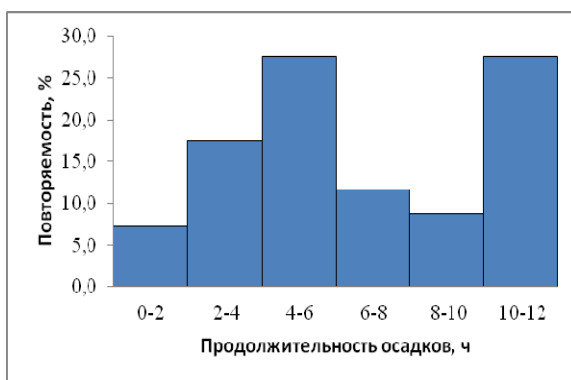


Рис. 2. Повторяемость (%) сильных осадков в зависимости от их продолжительности (ч).

Fig. 2. Repeatability (%) of heavy precipitation depending on their duration (h).

Как следует из рис. 2, чаще всего наблюдались сильные осадки с продолжительностью выпадения 4–6 ч и 10–12 ч. Причем меньшая продолжительность связана с ливневыми осадками, а большая – с обложными осадками и осадками смешанного характера. Также необходимо отметить, что чуть больше половины случаев осадков градации ОЯ было зафиксировано при продолжительности выпадения осадков менее 6 часов. Таким образом, количество осадков в градации ОЯ чаще всего складывается из нескольких ливневых зарядов или имеет смешанный характер.

С целью изучения зависимости значений индексов от синоптической ситуации для каждого случая с осадками градации ОЯ определялся тип

фронтальной системы, с которой они были связаны. Для случаев, зарегистрированных в период с 2004 по 2018 г., анализ проводился по архиву синоптических карт с помощью программного комплекса ГИС Метео. Так как архив карт ГИС Метео ограничен, то для расширения периода исследования (с 1979 по 2003 г.) были привлечены данные реанализа CFS. Для определения фронтальных разделов на основе реанализа были построены следующие карты: приземные, АТ850, ОТ500/1000 и карты распределения осадков. Построение карт проводилось с помощью программы OpenGraDS с последующим сохранением изображений в формате PNG.

Фронтальный анализ показал, что наибольшее число случаев сильных осадков было зафиксировано при прохождении фронтов окклюзии (33 %) и холодных фронтов (23 %). На внутримассовые осадки приходится 16 % случаев. Меньше всего случаев с ОЯ наблюдается при волновых возмущениях на малоподвижных фронтах (15 %) и при прохождении теплых фронтов (13 %) (рис. 3). Такое распределение напрямую связано со стадиями развития циклонов, в которых они подходят к Пермскому краю. В [4] показано, что чаще всего сильные осадки в Пермском крае связаны с западными или южными циклонами в стадии молодого или заполняющегося циклона. Кроме того, значительную роль в высокой повторяемости сильных осадков на фронтах окклюзии играют Уральские горы, которые способствуют удержанию циклонов над территорией Пермского края и их окклюдированию.

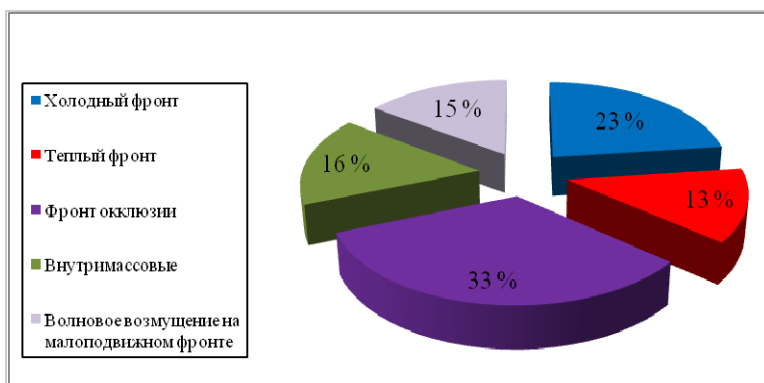


Рис. 3. Повторяемость (%) фронтальных систем, с которыми связаны сильные осадки.

Fig. 3. Repeatability (%) of frontal systems with which heavy precipitation is associated.

Для разных синоптических ситуаций характерны разные значения индексов неустойчивости, что свидетельствует о разной степени неустойчивости атмосферы. В табл. 1 представлены некоторые статистические характеристики индексов неустойчивости в зависимости от наблюдаемой фронтальной системы.

Таблица 1. Значения параметров неустойчивости в зависимости от фронтальной системы**Table 1.** Values of instability parameters depending on the frontal system

Индекс	Характеристика	Прохождение ХФ	Прохождение ТФ	Прохождение ФО	Волновое возмущение на малоподвиж- ном фронте	Внутримассовые
CAPE, Дж/кг	Медиана	479	146	212	287	1295
	Среднее	991	538	512	574	1258
CIN, Дж/кг	Медиана	0	0	0	0	0
	Среднее	-3	0	-1	-1	-2
DCI, °C	Медиана	23	17	20	23	25
	Среднее	23	18	17	21	26
Индекс Фатеева, °C	Медиана	22	20	22	22	16
	Среднее	20	18	21	20	15
K Index, °C	Медиана	35	33	33	35	34
	Среднее	35	33	32	35	34
LI, °C	Медиана	-2,0	-0,1	-0,2	-0,8	-4,1
	Среднее	-2,2	0,4	0,3	-0,3	-3,8
TI, °C	Медиана	37	34	34	37	37
	Среднее	36	34	33	36	37
TQ Index, °C	Медиана	20	18	18	20	20
	Среднее	19	18	18	19	20

Из табл. 1 видно, что для сильных дождей, связанных с внутримассовыми процессами, прохождением холодных фронтов и волновых возмущений на малоподвижных фронтах, в целом характерны более высокие значения параметров неустойчивости, чем для сильных дождей связанных с прохождением теплых фронтов и фронтов окклюзии.

Стоит также отметить, что ливневой тип осадков характерен для всех выше перечисленных синоптических ситуаций. Однако чаще всего они наблюдались на холодных фронтах и при внутримассовых процессах. Обложные осадки практически в равной степени наблюдались на основных фронтальных разделах (ТФ, ХФ, ФО). Половина осадков смешанного характера наблюдалась на фронтах окклюзии (табл. 2).

Также для разных типов осадков характерны разные значения индексов неустойчивости (табл. 3).

Таблица 2. Повторяемость типов осадков в зависимости от синоптической ситуации (%)**Table 2.** The frequency of occurrence of precipitation types depending on the synoptic situation (%)

Тип осадков	Прохождение ХФ	Прохождение ТФ	Прохождение ФО	Внутри-массовые	Волновое возмущение на малоподвижном фронте
Ливневые	28	9	11	29	23
Обложные	20	20	60	–	–
Смешанные	24	8	48	–	20

Таблица 3. Значения параметров неустойчивости в зависимости от типов осадков**Table 3.** Values of instability parameters depending on precipitation types

Индекс	Характеристика	Тип осадков		
		Ливневые	Обложные	Смешанные
CAPE , Дж/кг	Макс.	3017	198	509
	Мин.	0	0	0
	Среднее	966	52	141
CIN , Дж/кг	Макс.	0	0	0
	Мин.	-19	-1	-2
	Среднее	-1	0	0
DCI , °C	Макс.	38	15	24
	Мин.	13	-3	-6
	Среднее	25	10	12
Индекс Фатева , °C	Макс.	25	25	25
	Мин.	-26	19	0
	Среднее	16	22	21
K Index , °C	Макс.	42	36	37
	Мин.	21	22	19
	Среднее	35	30	31
LI , °C	Макс.	3,3	9,4	14,0
	Мин.	-8,1	0,2	-1,5
	Среднее	-2,7	3,4	3,0
TI , °C	Макс.	46	39	37
	Мин.	20	18	12
	Среднее	37	29	29
TQ Index , °C	Макс.	24	20	21
	Мин.	14	10	8
	Среднее	20	17	17

Наибольшая разница наблюдается для индексов, основанных на методе частицы (CAPE и LI), за исключением индекса CIN. Индексы же, основанные на температурно-влажностных характеристиках атмосферы, изменяются от одного типа осадков к другому менее значительно, что свидетельствует о том, что для выпадения осадков, превышающих критерии ОЯ, атмосфера не обязательно должна быть сильно неустойчивой. Если атмосфера устойчива или слабонеустойчива, то возможность выпадения осадков градации ОЯ можно оценить по индексам, основанным на температурно-влажностных характеристиках.

В целом наблюдается довольно сильная обратная (для индекса LI прямая) зависимость между значениями индексов и продолжительностью выпадения осадков. Чем больше значения индексов, тем меньше продолжительность осадков.

Обобщая результаты исследования, можно сделать следующие выводы.

1. Большая часть случаев осадков градации ОЯ на территории Пермского края связана с прохождением холодных фронтов и фронтов окклюзии. Реже всего сильные осадки образуются на теплых фронтах. При этом для холодных фронтов характерны более высокие значения индексов неустойчивости, чем для фронтов окклюзии.

2. Сильные осадки, достигшие критерия ОЯ, имеют преимущественно ливневой характер по данным наблюдений и смешанного характера по данным исследований. Доля обложных осадков очень мала. Ливневые дожди чаще всего образуются на холодных фронтах и при внутримассовых процессах, а обложные и смешанные преимущественно связаны с фронтами окклюзии.

3. При разных типах осадков наблюдаются различия в значениях индексах неустойчивости. Больше всего эта разница проявляется в индексах, характеризующих неустойчивость атмосферы, и в меньшей степени свойственна индексам, характеризующим условия увлажнения, что свидетельствует о том, что для образования сильных осадков ливневого, обложного и смешанного типа характерны практически одинаковые температурно-влажностные характеристики.

4. Сильные дожди чаще всего имеют продолжительность выпадения от 4 до 6 ч. Для обложных дождей продолжительность выпадения составляет 10–12 ч. При этом существует довольно сильная обратная связь между продолжительностью осадков критерия ОЯ и значениями индексов неустойчивости. Чем больше значения индексов неустойчивости, тем меньшая продолжительность наблюдается.

Исследование проведено при финансовой поддержке РФФИ (проект № 17-45-590850 p_a).

Список литературы

1. Алексеева А.А. Подходы к решению проблемы прогнозирования сильных летних осадков // Труды Гидрометцентра России. 2014. Вып. 351. С. 51-67.
2. Богаткин О.Г. Авиационные прогнозы. 2-е изд., стереотипное. СПб.: БХВ-Петербург, 2010. 288 с.
3. Калинин Н.А., Шихов А.Н., Быков А.В., Тарасов А.В. Анализ результатов численного прогноза ливневых осадков по модели WRF с применением различных параметризаций конвекции (на примере территории Пермского края) // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2019. Вып. 373. С. 43-59.
4. Костарев С.В., Ветров А.Л., Тиунов В.Е., Быков А.В. Синоптическая типизация случаев сильных дождей в Пермском крае // Географический вестник. 2018. №3(46). С. 56-64.
5. Марченко О. Ю., Мордвинов В. И., Антохин П. Н. Исследование долговременной изменчивости и условий формирования атмосферных осадков в бассейне реки Селенга // Оптика атмосферы и океана. 2012. Т. 25, № 12. С. 1084-1090.
6. Матвеев Л.Т. Курс общей метеорологии. Физика атмосферы. Л.: Гидрометеиздат, 1984. 751 с.
7. Наставление гидрометеорологическим станциям и постам. Выпуск 3. Часть 1. Л.: Гидрометеиздат, 1985. 301 с.
8. Об утверждении и вводе в действие Перечня и критерий опасных гидрометеорологических явлений (ОЯ) по территории деятельности ФГБУ «Уральское УГМС»: приказ № П-01-2015/35-3 от 9 апреля 2015 г.
9. РД 52.04.563–2013. Инструкция по подготовке и передаче штормовых сообщений наблюдательными подразделениями. 49 с.
10. Gracier Jurgen. Convection Parameters. URL: <http://www.juergengrieser.de/ConvectionParameters/ConvectionParameters.pdf> (дата обращения 20.02.2019).
11. Henry N.L. A Static Stability Index for Low-Topped Convection // Wea. Forecast. 2000. Vol. 15. P. 246-254.
12. 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. Forecast. 2003. Vol. 18. P. 1243-1261.

References

1. Alekseeva A.A. The approaches to solving the problems of forecasting heavy summer precipitation. *Trudy Gidromettsentra Rossii [Proceedings of the Hydrometcentre of Russia]*, 2014, vol. 351, pp. 51–67 [in Russ.].
2. Bogatkin O.G. Aviacionnye prognozy. 2-e izd., stereotipnoe. Saint Petersburg, BHV-Peterburg, 2010, 288 p.
3. Kalinin N.A., Shikhov A.N., Bykov A.V., Tarasov A.V. Analysis of numerical forecasts of heavy precipitation with the WRF model using various convection schemes (a case study for the Perm Krai). *Gidrometeorologicheskie issledovaniya i prognozy [Hydrometeorological Research and Forecasting]*, 2019, vol. 373, pp. 43-59 [in Russ.].
4. Kostarev S.V., Vetrov A.L., Tiunov V.E., Bykov A.V. Synoptic typification of heavy rain events in Perm region. *Geograficheskij vestnik [Geographical bulletin]*, 2018, no. 3(46), pp. 56-64 [in Russ.]. DOI: 10.17072/2079-7877-2018-3-56-64.
5. Marchenko O.Yu., Mordvinov V.I., Antochin P.N. Investigation of long-term variability and conditions for formation of precipitation in the Selenge River basin. *Optika Atmosfery i Okeana [Atmospheric and Oceanic Optics]*, 2012, vol. 25, no. 12, pp. 1084-1090 [in Russ.].
6. Matveev L.T. Kurs obshchey meteorologii. Fizika atmosfery. Leningrad, Gidrometeoizdat publ., 1984, 751 p. [in Russ.].
7. Nastavlenie gidrometeorologicheskim stanciyam i postam. Vyp. 3. Ch. 1. Leningrad, Gidrometeoizdat publ., 1985, 301 p. [in Russ.].

8. Ob utverzhdenii i vvode v dejstvie Perechnya i kriterij opasnyh gidrometeorologicheskij yavlenij (OYA) po territorii deyatel'nosti FGBU «Ural'skoe UGMS»: prikaz № P-01-2015/35-3 ot 9 aprelya 2015 g. [About the approval and commissioning of the List and criteria of dangerous hydrometeorological phenomena (OY) on the territory of activity of the Federal state budgetary institution «Ural UGMS»: order no. P-01-2015/35-3 from April 9, 2015.] [in Russ.].

9. RD 52.04.563–2013. Instrukciya po podgotovke i predache shtormovyh soobshcheniy nablyudatel'nymi podrazdeleniyami. 49 p. [in Russ.].

10. *Gracier Jurgen*. Convection Parameters. Available at: <http://www.juergengrieser.de/ConvectionParameters/ConvectionParameters.pdf>.

11. *Henry N.L.* A Static Stability Index for Low-Topped Convection. *Wea. Forecast.*, 2000, vol. 15, pp. 246-254.

12. *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. Forecast.*, 2003, vol. 18, pp. 1243-1261.

Поступила в редакцию 18.11.2019 г.

Received by the editor 18.11.2019.