

УДК 551.50(470.53)(045)

*Е.В. Пищальникова, Е.В. Акилов***ФАЗОВОЕ СОСТОЯНИЕ АТМОСФЕРНЫХ ОСАДКОВ В ПЕРМСКОМ КРАЕ¹**

Фазовое состояние осадков является одним из значимых климатических индикаторов в условиях глобального потепления. Распределение временной повторяемости форм осадков дает представление об изменениях, происходящих в окружающей среде. Рассмотрено пространственно-временное распределение осадков с учетом их морфологической классификации. Установлена тенденция к уменьшению количества осадков, выпадающих в твердой форме. Выявлено преобладание жидкой фазы осадков над твердой фазой в годовой сумме в среднем на 3 % на фоне большей повторяемости твердых осадков. На основе кластерного анализа проведено районирование территории Пермского края по преобладающим формам осадков и выделено три зоны: северо-восток, центр и юг Пермского края. Особое внимание уделено отдельным видам осадков: смешанным и переохлажденным, как наиболее трудно прогнозируемым и имеющим сложные механизмы образования. Определены синоптические ситуации, благоприятные для их формирования: смешанные осадки – теплый сектор циклона, переохлажденные – ложбина с теплым фронтом. Анализ термического состояния нижней тропосферы позволил установить мощность теплого слоя (при его наличии), высоту расположения нулевой изотермы и преобладающую приземную температуру воздуха.

Ключевые слова: фазовое состояние осадков, температурный профиломер, синоптическое положение, температурная стратификация, Пермский край.

DOI: 10.35634/2412-9518-2020-30-2-200-206

Атмосферные осадки, особенно некоторые из их видов, могут оказать существенное негативное воздействие на хозяйственную деятельность человека. Надежные прогнозы погоды способны ограничить связанные с ними угрозы безопасности и экономические потери. При этом одним из первостепенных элементов прогнозирования является учет механизма формирования фазового состояния осадков [1], особенно в переходные сезоны, когда наблюдаются частые колебания приземной температуры воздуха около 0 °С, что создает ситуации, когда от десятых долей градуса зависит форма выпадающих осадков. Проблеме механизма формирования фазового состояния осадков посвящены исследования многих как российских, так и зарубежных ученых [2-7]. Приводится анализ синоптических условий и термического состояния нижней тропосферы при формировании разных видов осадков в Пермском крае.

Материалы и методы исследований

Исследование временного распределения фазового состояния осадков построено на морфологической классификации, согласно которой осадки, выпадающие на земную поверхность, делятся на жидкие, твердые и смешанные. К жидким осадкам относятся дождь и морось. Твердые виды осадков отличаются большим разнообразием, к ним относятся снег, снежная крупа, снежные зерна, ледяной дождь, град, ледяные иглы. К смешанным видам осадков относится мокрый снег. Материалом для исследования послужили данные температурного профиломера МТР-5, расположенного на территории ПГНИУ, наблюдения за количеством осадков (наблюдения 2 раза в сутки) и характером погоды в срок и между сроками наблюдений (8 раз в сутки) 25 метеорологических станций Пермского края. Срочные данные получены из архива метеорологической информации «Расписание погоды» [8] за 2006–2018 гг. Основными средствами данного исследования являются программные пакеты Excel и ГИС-технологии. Главный метод анализа данных – синоптический подход.

Результаты и их обсуждение

Анализ данных с наземной сети наблюдений в Пермском крае позволил выявить, что ежегодно на территории региона отмечается от 280 до 335 дней с осадками. Их суточное количество составляет не более 1 мм. Выпадение осадков связано в основном с фронтальной системой облаков Sc – Ac, из

¹ Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект № 19-45-590021 p_a).

них слоисто-кучевая облачность имеет наибольшую повторяемость (20–30 %). Образование конвективных облаков не превышает 15 % и тесно связано с сезоном года. В годовой сумме величина осадков в жидкой форме доминирует над твердой формой в среднем на 3 %. Кроме того с 2013 г. и по настоящее время отмечается тенденция к уменьшению количества твердых осадков.

Изучение особенностей распределения осадков разной формы по территории Пермского края с учетом циркуляции атмосферы и особенностей рельефа позволило выполнить районирование региона и выделить три области: северо-восток, центр и юг (рис. 1).

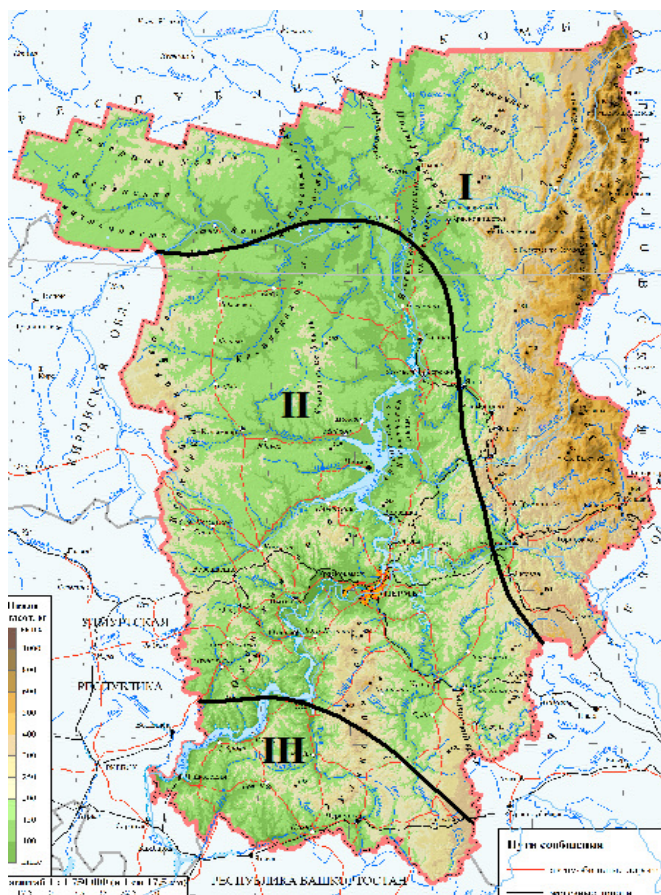


Рис. 1. Районирование территории Пермского края по преобладающей форме осадков:

I – Северо-восточный район,

II – Центральный район,

III – Южный район.

Если в количественном соотношении преобладают жидкие осадки, то по повторяемости в Пермском крае с небольшим перевесом чаще наблюдаются осадки в твердой форме. Их явное преимущество характерно для северо-восточного района. Вторая по повторяемости форма осадков – жидкая. Это форма осадков преобладает в южном районе. Минимальная частота формирования характерна для смешанных осадков (не более 13 % от общего числа). Отличительной чертой центрального района является выпадение осадков с равной повторяемостью 44 % как в жидком, так и в твердом виде (таблица). Суточная продолжительность выпадения осадков в жидком и смешанном виде имеет равномерное территориальное распределение и составляет 4–5 ч. Выпадение осадков в твердой форме в целом характеризуется большей длительностью и достигает 9–13 ч/сутки.

Кроме того, к жидким осадкам относится особый вид – переохлажденные осадки – это дождь или морось из переохлажденных капель, выпадающие при отрицательной температуре окружающей среды. Ударяясь об открытые поверхности, капли замерзают и образуют гололед [9]. В синоптической сводке (КН-01 [10]) этот вид осадков обозначается цифрами кода 66–67 (56–57) и расшифровывается как дождь (морось), замерзающий слабый или умеренный, образующий гололед. Повторяемость переохлажденных осадков за 2006–2018 гг. в Пермском крае составила 70 случаев с годовой суммой 5,6 мм, доля их в среднегодовой сумме жидких осадков не превышает 3 %.

Число дней с осадками (процент от общего числа дней с осадками) на территории Пермского края с учетом районирования за 2006–2018 гг.

Районы Пермского края		Форма осадков		
		жидкие	твердые	смешанные
I	Северо-восточный	140 (42)	150 (45)	45 (13)
II	Центральный	140 (44)	140 (44)	40 (13)
III	Южный	125 (45)	120 (43)	35 (13)

Повторяемость и суммарное количество смешанных и переохлажденных осадков на порядок меньше снега и дождя. Однако нельзя не учитывать опасность явлений, к которым они могут привести (налипание мокрого снега, гололед, сложное отложение) и специфику их прогноза – наименьшая успешность прогнозирования среди остальных типов осадков. Указанные типы осадков имеют сезонное

распределение. Так, повторяемость смешанных осадков за 2006–2018 гг. в Пермском крае имеет следующие особенности: максимум повторяемости приходится на март и октябрь; следующими по повторяемости месяцами являются апрель и ноябрь; минимум повторяемости приходится на июль и сентябрь. В августе не отмечалось ни одного случая смешанных осадков (рис. 2 А). Переохлажденные осадки отмечаются только в холодный период года (рис. 2 Б) с октября по март с максимумом повторяемости в ноябре и минимумом – в январе.

Анализ синоптических карт за 2006–2018 гг. позволил выявить наиболее благоприятные условия для формирования особенно трудно прогнозируемых видов осадков: переохлажденные осадки (дождь и морось), смешанные осадки (дождь со снегом, мокрый снег или снег с дождем). Дождь со снегом и снег с дождем имеют разное процентное содержание жидкой воды в составе осадков, отсюда следует, что связанные с ними погодные явления также будут носить разный характер. В большинстве случаев дождь со снегом не представляет особой опасности, однако отмечены случаи, когда они чередовались с переохлажденным дождем или моросью и их включали в период нарастания гололедных отложений. Налипание мокрого снега, в свою очередь, способствует увеличению нагрузки на провода и линии электропередач, что может вызывать аварийные отключения электричества.

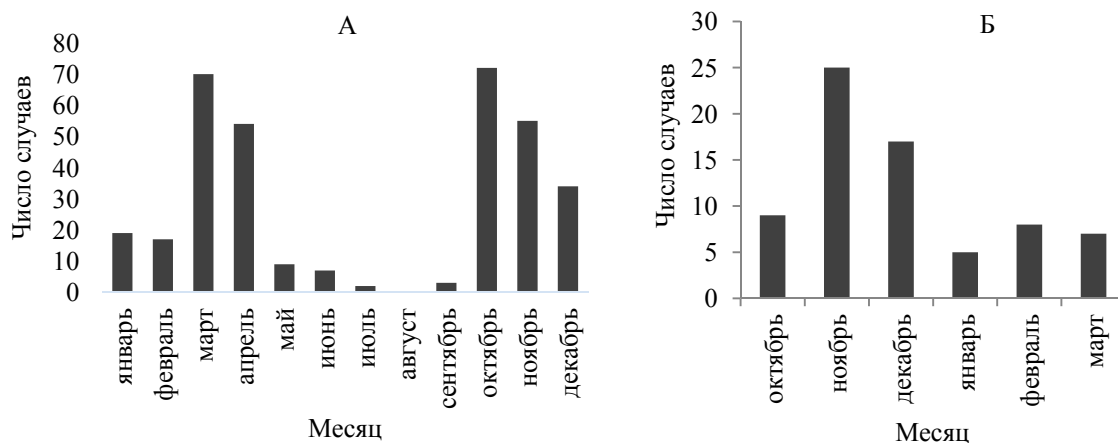


Рис. 2. Сезонное распределение осадков по данным МС Пермь–Опытная за 2006–2018 гг.: А – смешанных, Б – переохлажденных

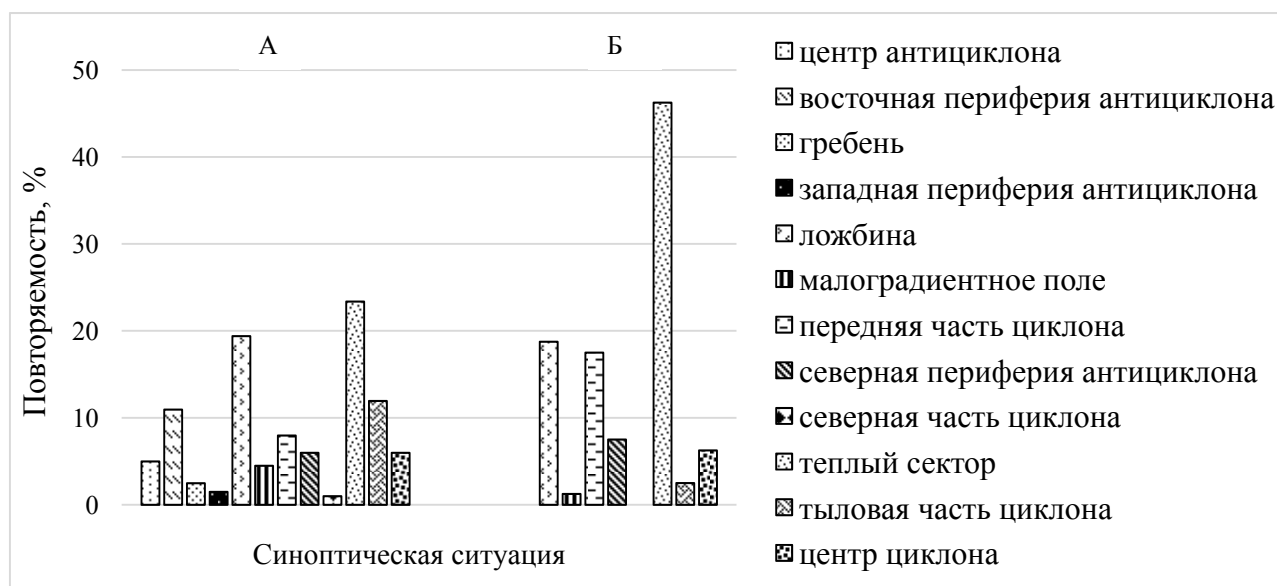


Рис. 3. Повторяемость смешанных осадков в зависимости от синоптического положения за 2006–2018 гг.: А – мокрый снег, Б – дождь со снегом

Синоптические условия для формирования дождя со снегом и мокрого снега во многом схожи и имеют следующие циркуляционные особенности (рис. 3): максимум их повторяемости наблюдается в теплом секторе циклона – 46 и 23 % соответственно. Вторая по частоте синоптическая ситуация – барическая ложбина, причем, как правило, с наличием фронтального раздела в ней: холодный фронт встречается в 30 % случаев, теплый фронт в 25 %, фронт окклюзии в 10 %.

Формирование дождя со снегом всегда связано с влиянием атмосферных фронтов: окклюзии – 50 % случаев, теплого – 42 %, холодного – 8 %. Минимум повторяемости для дождя со снегом отмечено при малоградиентном поле (1 %), для мокрого снега – северная часть циклона и западная периферия антициклона (1 %). Мокрый снег формируется в различных частях барического поля, особенностью является более частое влияние антициклонической деятельности. Отметим, что за исследуемый период выпадение осадков в виде мокрого снега наблюдалось в 2,5 раза чаще, чем в виде дождя со снегом.

Благоприятные условия для формирования переохлажденных осадков создаются в барической ложбине (в 85 % случаев ей сопутствовал теплый фронт), гребне и передней части циклона с повторяемостью 20, 20 и 18 % соответственно (рис. 4). Передняя часть циклона характеризуется наличием теплого фронта, который в свою очередь обуславливает наличие теплого слоя на высоте, что создает благоприятные условия для формирования переохлажденного дождя и мороси. Особого внимания требуют случаи формирования переохлажденных осадков под влиянием барического гребня. Здесь за счёт нисходящих движений воздуха образуется приземная температурная инверсия, в совокупности с выхолаживанием подстилающей поверхности наступают благоприятные условия для выпадения переохлажденных осадков из подынверсионных облаков и тумана.

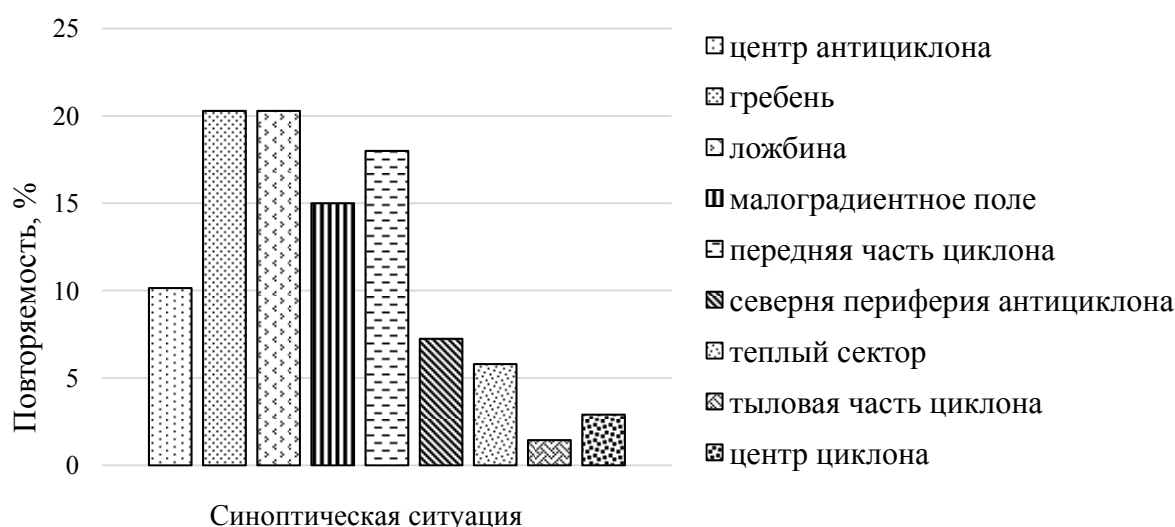


Рис. 4. Повторяемость переохлажденных осадков в зависимости от синоптического положения за 2006–2018 гг.

Для установления зависимости выпадения переохлажденных и смешанных осадков от термических условий тропосферы были использованы данные профиломера МТР-5, расположенного на территории ПГНИУ.

Анализ вертикального профиля температуры воздуха при выпадении мокрого снега позволил получить следующие результаты:

- в большинстве случаев наблюдалось отсутствие в приземном слое инверсионного хода температуры, наличие теплого (с положительными температурами) слоя воздуха (в среднем толщиной 210 м), прилегающего к подстилающей поверхности;
- в отдельных случаях (повторяемость не более 2 %) толщина теплого слоя составляет менее 100 и более 400 м. Увеличенная мощность слоя теплого воздуха во всех случаях была обусловлена влиянием теплого фронта. При толщине теплого слоя менее 100 м в половине случаев наблюдались антициклональные барические поля, влияние теплого фронта не отмечено;
- формирование мокрого снега происходит в основном (74 %) при высоте нулевой изотермы более 200 м (рис. 5).

Вертикальные распределения температуры для случаев выпадения дождя со снегом и мокрого снега, схожи между собой, что весьма ожидаемо (рис. 5), поскольку для обеих ситуаций требуется наличие теплого слоя прилегающего к подстилающей поверхности и отсутствие инверсионного распределения температуры у земли. Тем не менее, различия в положении нулевой изотермы, могут приводить к переходу от одной ситуации к другой. Отметим следующие отличия метеорологических параметров, обуславливающих выпадение дождя со снегом, от условий формирующих мокрый снег:

1) амплитуда температуры воздуха от уровня земли до 1000 м в случае выпадения дождя со снегом меньше на 2 °С, т. е. воздушный слой более однородный;

2) высота нулевой изотермы в случае формирования дождя со снегом составляет – 340 м, в среднем выше, тем самым обеспечивая более длительное таяние гидрометеора, находящегося в твердой фазе;

3) температура воздуха у поверхности земли превышает аналогичную при выпадении мокрого снега в среднем на 0,5 °С.

Минимальная толщина теплого слоя в случае выпадения дождя со снегом составляет 200 м, его максимальная мощность достигала 600 м (их повторяемость 17 % и 4 % соответственно). Высота расположения нулевой изотермы в большинстве случаев (58 %) была более 340 м.

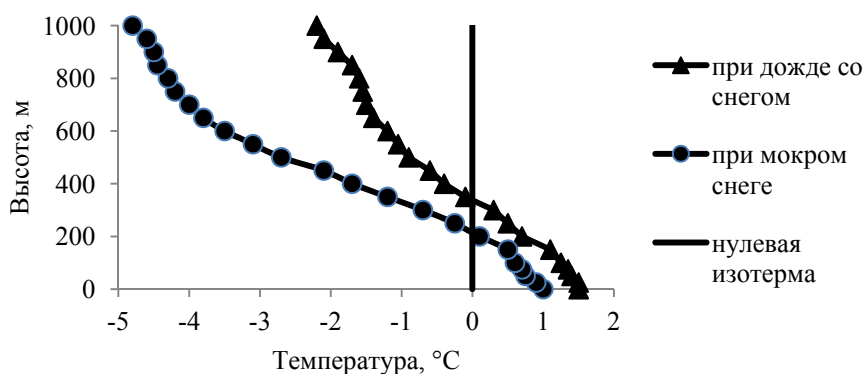


Рис. 5. Вертикальное распределение температуры воздуха при выпадении смешанных осадков

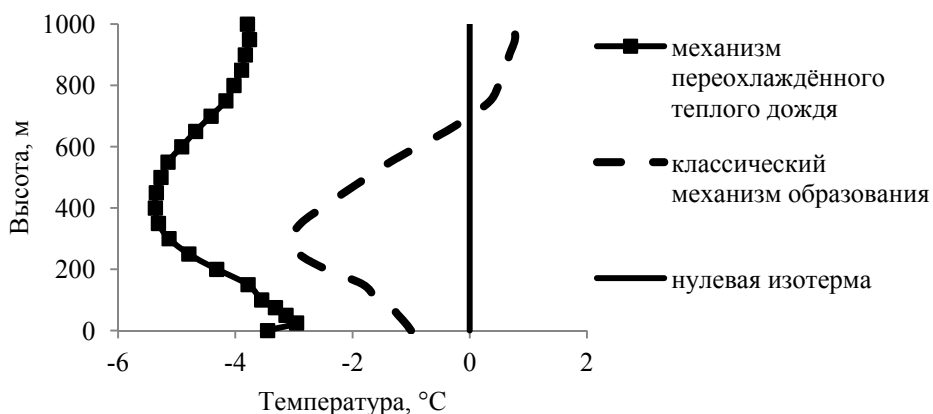


Рис. 6. Вертикальное распределение температуры воздуха при переохлажденных осадках

Рассмотрим температурную стратификацию атмосферы при выпадении переохлажденных осадков. Согласно классическому механизму образования [11] их выпало 30 % от общего числа случаев. Остальные 70 % случаев сформировались согласно механизму переохлажденного теплого дождя [12]. Важным отличием в механизмах образования, как видно из рис. 6, является наличие слоя с положительной температурой воздуха. В среднем на высоте 700 м проходит раздел воздушных масс с положительной (выше) и отрицательной (ниже) температурой, при его прохождении гидрометеор с нисходящей траекторией приобретает отрицательную температуру. Средняя температура воздуха у поверхности земли при выпадении переохлажденных осадков составляет -1 °С, преобладающий интервал температуры выпадения данных осадков от 0 до -3,1 °С. Интересно отметить, что наименьшая

температура воздуха наблюдается на высоте 300 м, далее приближаясь к земной поверхности, температура повышается. Вероятно, что отсутствие продолжительного понижения температуры воздуха обуславливает не полное замерзание (до ледяной скорлупы) переохлаждённых осадков. Вследствие чего, достигая земной поверхности, выпадающие осадки образуют гололед.

Вывод

Атмосферные осадки, выпадающие на территории Пермского края, имеют большое видовое разнообразие. В течение года осадки выпадают как в жидкой, так и в твердой форме, что осложняет прогноз явлений погоды, зависящих от фазы осадков (гололед, налипание мокрого снега на провода, метель). Наиболее сложно прогнозируемыми видами осадков остаются смешанные и переохлажденные, так как имеют разные механизмы образования. Классический механизм формирования переохлажденных осадков успешно интегрирован в постпроцессинг гидродинамического прогноза погоды с помощью алгоритмов. В то время как процесс «переохлажденного теплого дождя» не всегда воспроизводится в гидродинамических моделях циркуляции атмосферы. В результате данного исследования было показано, что подавляющее большинство случаев образования переохлажденных осадков происходило по принципу «переохлажденного теплого дождя». Таким образом, данное исследование может служить основой для разработки синоптико-статистического метода прогноза фазового состояния атмосферных осадков, в частности переохлажденных осадков.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шакина Н.П., Хоменко И.А., Иванова А.Р., Скриптунова Е.Н. Образование и прогнозирование замерзающих осадков: обзор литературы и некоторые новые результаты // Труды гидрометеорологического научно-исследовательского центра Российской Федерации. 2012. С. 130–161.
2. Калинин Н.А., Смородин Б.Л. Редкое явление замерзающего дождя в Пермском крае // Метеорология и гидрология. 2012. № 8. С. 27–35.
3. Baldwin M., Treadon R., Contorno S. Precipitation type prediction using a decision tree approach with NMCs mesoscale ETA model // Preprints, 10th Conf. on Numerical Weather Prediction, Portland, OR, AMS. 1994. P. 30–31.
4. Bourgouin P. A method to determine precipitation type // Weather and Forecasting. 2000. Vol. 15. P. 583–592.
5. Chakina N.P. Winter storms in Russia // Storms. London, Routledge 2000. Vol. 1. P. 506–525.
6. Khomenko I.A., Ivanova A.R., Chakina N.P., Skriptunova E.N., Zavyalova A.A. Freezing precipitation in Russia and the Ukraine: conditions of formation and an approach to probabilistic forecasting // EGU General assembly, Vienna, 02-07 April 2006. P. 288.
7. Pischalnikova E.V., Kalinin N.A., Akilov E.V. Precipitation in the catchment area of the Votkinsk reservoir: Nature, type and temporal variability // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2019. Vol.321. DOI: 10.1088/1755-1315/321/1/012007.
8. Расписание погоды. URL: <https://www.rp5.ru> (дата обращения: 20.03.2018).
9. Хромов С.П., Мамонтова Л.И. Метеорологический словарь. Л.: Гидрометеиздат, 1974. 569 с.
10. Код для оперативной передачи данных приземных метеорологических наблюдений с сети станций Росгидромета (КН-01 SYNOP) / Росгидромет. М., 2012. 78 с.
11. Bennetts W.J. The sleet storm in Northern New York, March 25–27 // Mon. Weather. Rev. 1913. Vol. 41. P. 372–373.
12. Vochieri J.R. The objective use of upper level soundings to specify precipitation type // Mon. Weather Rev. 1980. Vol. 108. P. 596–603.

Поступила в редакцию 25.03.2020

Пищальникова Евгения Владимировна, кандидат географических наук, начальник отдела Метеорологических прогнозов, доцент кафедры метеорологии и охраны атмосферы Пермский центр по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды – филиал ФГБУ «Уральское УГМС»
614030, Россия, г. Пермь, ул. Новогайвинская, 70
ФГБОУ ВО «Пермский государственный национальный исследовательский университет»
614990, Россия, г. Пермь, ул. Букирева, 15
E-mail: evaporova@rambler.ru

Акилов Евгений Вячеславович, студент 1 курса магистратуры кафедры гидрологии суши ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный университет»
199178, Россия, г. Санкт-Петербург, ул. 10 линия ВО, 33–35
E-mail: akilov.evg@yandex.ru

E.V. Pishchalnikova, E.V. Akilov

PHASE STATE OF ATMOSPHERIC PRECIPITATION IN THE PERM REGION

DOI: 10.35634/2412-9518-2020-30-2-200-206

The phase state of precipitation is one of the significant climatic indicators in conditions of global warming. The distribution of the temporal frequency of precipitation forms gives an idea of the changes occurring in the environment. This article discusses the spatial and temporal distribution of precipitation, taking into account their morphological classification. A tendency to a decrease in the amount of precipitation falling in solid form has been established. The prevalence of the liquid phase of precipitation over solid in the annual amount by 3 % on average against the background of a greater repeatability of solid precipitation was revealed. Based on cluster analysis, zoning of the territory of the Perm region was carried out according to the prevailing forms of precipitation. Three zones have been distinguished: north-east, center and south. Particular attention is paid to certain types of precipitation: mixed and supercooled, as the most difficult to predict and having complex formation mechanisms. Favorable synoptic situations were determined: a warm sector of a cyclone and a hollow with a warm front. An analysis of the thermal state of the lower troposphere made it possible to establish the thickness of the warm layer (if any), the height of the zero isotherm, and the prevailing surface air temperature.

Keywords: phase state of precipitation, temperature profiler, synoptic position, temperature stratification, Perm region.

REFERENCES

1. Shakina N.P., Khomenko I.A., Ivanova A.R., Skriptunova E.N. [The formation and forecasting of freezing precipitation: a literature review and some new results], in *Trudy gidrometeorologicheskogo nauchno-issledovatel'skogo tsentra*, 2012, pp. 130–161 (in Russ.).
2. Kalinin N.A., Smorodin B.L. [A rare phenomenon of freezing rain in the Perm region], in *Meteorologiya i gidrologiya*, 2012, no. 8, pp. 27–35 (in Russ.).
3. Baldwin M., Treadon R., Contorno S. Precipitation type prediction using a decision tree approach with NMCs mesoscale ETA model, in *Preprints, 10th Conf. on Numerical Weather Prediction*, Portland, OR, AMS, 1994, pp. 30–31.
4. Bourgouin P. A method to determine precipitation type, in *Weather and Forecasting*, 2000, vol. 15, pp. 583–592.
5. Chakina N.P. Winter storms in Russia, in *Storms*. London, Routledge, 2000, vol. 1, pp. 506–525.
6. Khomenko I.A., Ivanova A.R., Chakina N.P., Skriptunova E.N., Zavyalova A.A. Freezing precipitation in Russia and the Ukraine: conditions of formation and an approach to probabilistic forecasting, in *European Geosciences Union General assembly*, Vienna, 02-07 April 2006, pp. 288.
7. Pishchalnikova E.V., Kalinin N.A., Akilov E.V. Precipitation in the catchment area of the Votkinsk reservoir: Nature, type and temporal variability, in *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2019, vol.321. DOI: 10.1088/1755-1315/321/1/012007.
8. *Raspisaniye pogody* [Schedule of weather], Available at: <https://www.rp5.ru> (accessed: 20.03.2018) (in Russ.).
9. Khromov S.P., Mamontova L.I. *Meteorologicheskii slovar'* [Meteorological dictionary]. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1974, 569 p. (in Russ.).
10. *Kod dlya operativnoy peredachi dannykh prizemnykh meteorologicheskikh nablyudeniy s seti stantsiy Rosgidrometa* (KN-01 SYNOP) [Code for rapid transmission of ground-level meteorological observations data from the Roshydromet station network (KH-01 SYNOP)], Rosgidromet, 2012, 78 p. (in Russ.).
11. Bennetts W.J. The sleet storm in Northern New York, March 25–27, in *Mon. Weather. Rev.*, 1913, vol. 41, pp. 372–373.
12. Bochieri J.R. The objective use of upper level soundings to specify precipitation type, in *Mon. Weather Rev.*, 1980, vol. 108, pp. 596–603.

Received 25.03.2020

Pishchalnikova E.V., Candidate of Geography, Head of weather forecasts, Associate Professor
at Department of Meteorology and Air Protection
Perm Center for Hydrometeorology and Environment Monitoring
Novogayvinskaya st., 70, Perm, Russia, 614030
Perm State University
Bukireva st., 15, Perm, Russia, 614990
E-mail: evapopova@rambler.ru

Akilov E.V., Master at Department of Hydrology Land
Saint Petersburg State University
10 line VO st., 33-35, St Petersburg, Russia, 199178
E-mail: akilov.evg@yandex.ru