

УДК 551.583

DOI: 10.47928/1726-9946-2020-20-2-47-57

Статистические оценки частотного распределения «базовой триады» осадков на юге России

Ташилова А.А.

Представлено академиком АМАН Х.М. Каловым

Изменение осадков в ответ на потепление происходит более неравномерно, чем ранее, и происходит это в основном во время событий, которые считаются экстремальными. В отличие от температуры, где изменение климата можно рассматривать как простой сдвиг распределения, форма распределения осадков меняется с потеплением, так что ливневые дожди составляют большую долю общего количества осадков [1-3]. В работах [4, 5] отмечается, что в связи с изменением климата характер тенденций выпадения осадков носит все более асимметричный вид. Модели климата проектируют изменения в осадках, которые будут еще более неравномерны, чем современные осадки [6].

Полученные ранее оценки пространственного распределения температуры и осадков в работах [7, 8] свидетельствуют о том, что статистическая структура полей сумм осадков имеет небольшой масштаб корреляции. Корреляция между осадками м/станций достаточно быстро затухает с расстоянием. Для полей температуры характерна более высокая степень пространственной когерентности (т.е. больший масштаб корреляции), чем для полей осадков. Формирование режима температуры больше зависит от крупномасштабных атмосферных циркуляций, а преимущественную роль в формировании полей осадков играют региональные особенности рельефа, высоты над уровнем моря, наличия водоемов и т.д.

В данной работе представлены результаты статистических оценок частотного распределения *годовых* осадков (сумма осадков (P), суточный максимум осадков (P_{max}) и число дней с осадками 20 мм и более ($NR20$)) на юге ЕТР за период с 1961 по 2018 гг. по данным 20-ти метеостанций государственной сети Росгидромета. Одним из необходимых параметров для построения гистограммы с частотным распределением (интегральные частоты, %) является расчет количества интервалов (карманов) и их ширины (шаг кармана). Количество интервалов гистограммы (карманов) зависит от количества данных и для оценки оптимального для массива данных количества интервалов используется формула Стерджеса [9] :

$$n \sim 1 + 3,322 \lg N,$$

где N – количество всех значений исследуемого массива.

Для определения шага кармана (Δ) находится разность максимального (R_{max}) и минимального (R_{min}) значений годовых сумм осадков за 1961-2018 гг. и делится на количество интервалов ($n = 7$ при $N = 58$):

$$\Delta = (R_{max} - R_{min})/n.$$

Прибавляя полученное значение ширины кармана сначала к минимальному значению и, переходя в следующую ячейку ниже, доходим до максимального значения кармана. Интервалом считается следующий диапазон: $(i - 1; i]$ или $i < X \leq i$ (нестрогая верхняя граница интервала – это значение в ячейке, нижняя строгая граница значение в предыдущей ячейке). Например, в ряду годовых сумм осадков на юге ЕТР максимальное и минимальное значения составляют соответственно $R_{max} = 767,85$ мм и $R_{min} = 401,63$ мм. Тогда ширина кармана равна: $\Delta (767,85-401,63)/7 = 52,32$ (мм) (таблица 1).

Статистические оценки частотного распределения годовых осадков (P , P_{max} и $NR20$) за 1961-2018 гг. на юге европейской территории России (ЕТР) приведены в таблицах 1-3. Частота возникновения события по абсолютной величине и в интегральном виде представлена на рисунках 1-6. Интегральная кривая накопления характеризует накопления в каждом последующем кармане в процентах (до 100%).

Сумма осадков. Частота возникновения события (годовая сумма осадков в заданном интервале) представлена в таблице 1 и на рисунке 1 (интегральные значения (%) и по абсолютной величине (n)).

Таблица 1

Статистические оценки частотного распределения годовых сумм осадков за 1961-2018 гг., юг ЕТР

Карман (мм) по возрастанию	Частота (кол-во лет)	Интегральный %	Карман (мм)	Частота (кол-во лет) по убыванию	Интегральный %
401,6	1	1,7%	610,9	19	33%
453,9	0	1,7%	663,2	12	53%
506,3	2	5,2%	558,6	11	72%
558,6	11	24,1%	715,5	8	86%
610,9	19	56,9%	767,0	5	95%
663,2	12	77,6%	506,3	2	98%
715,5	8	91,4%	401,6	1	100%
767,8	5	100,0%	453,9	0	100%

Из таблицы 1 видно, что за период 1961-2018 гг. 53% выпавших годовых сумм осадков имели величину от 611 мм до 663 мм; 9% годовых сумм осадков (5 событий) имели наибольшую величину 767,85 мм; 1,7% годовых сумм осадков (1 событие) имели наименьшую величину 401,63 мм.

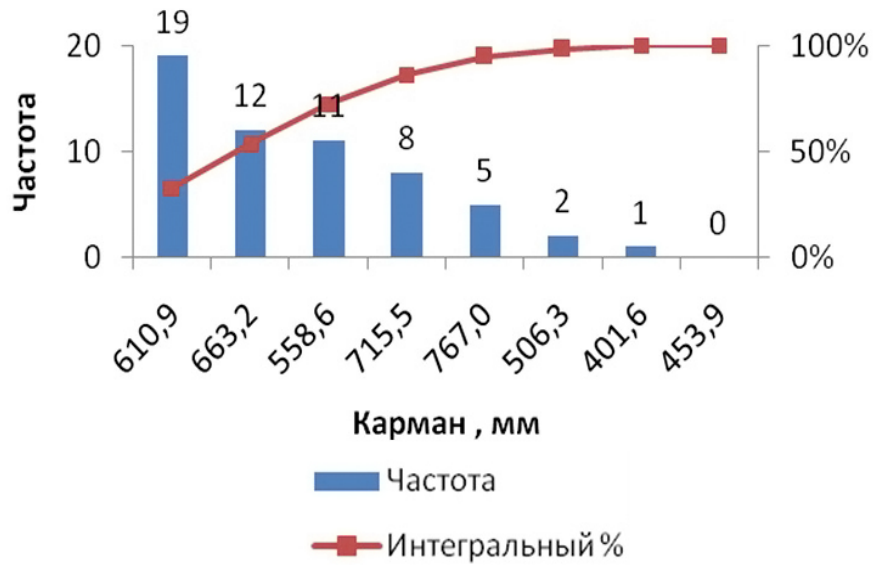


Рисунок 1 – Гистограмма годовых сумм осадков за 1961-2018 гг.

Таким образом, на выпадение *максимальных* годовых сумм осадков приходилось большее количество лет (5 лет из 58), чем на *минимальные* годовые осадки (1 год из 58).

Используя данные таблицы 1 и рисунка 1, перейдем от абсолютной частоты (n) к относительной частоте (%) и на основании полученных результатов определим эмпирическую выборочную функцию $F(x)$ как:

$$F(x) = \begin{cases} 1,7\% & \text{при } x = 400\text{мм,} \\ 0\% & \text{при } x = 450\text{мм,} \\ 3,4\% & \text{при } x = 500\text{мм,} \\ 19\% & \text{при } x = 550\text{мм,} \\ 33\% & \text{при } x = 600\text{мм,} \\ 21\% & \text{при } x = 650\text{мм,} \\ 14\% & \text{при } x = 700\text{мм,} \\ 9\% & \text{при } x = 750\text{мм,} \\ 0\% & \text{при } x = 800\text{мм.} \end{cases} \quad (1)$$

Данные функции распределения годовых сумм осадков (формула (1)) позволяют построить гистограмму эмпирической функции распределения $F(x)$ годовых сумм осадков за период 1961-2018 гг. (рис. 2).

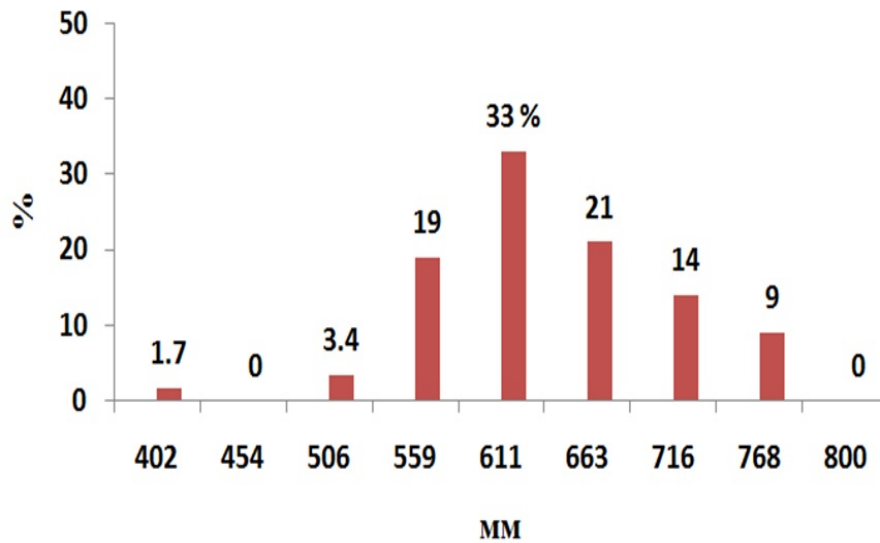


Рисунок 2 – Гистограмма эмпирической функции распределения $F(x)$ годовых сумм осадков за 1961-2018 гг.

Эмпирическая функция распределения имеет вид гауссового распределения с небольшой правосторонней асимметрией, что является следствием преобладания высоких годовых сумм осадков ($P=650$ мм (21%), $P=700$ мм (14%), $P=750$ мм (9%)) выше модальных значений $P=600$ мм (33%).

За период 1961-2018 гг. на 51% зимних сумм осадков приходилось значение от 103,1 мм по 112,5 мм; на максимальные зимние суммы осадков (155,1 мм) приходилось 3,4 % (2 сезона из 58); на минимальные зимние суммы осадков (78,7 мм) – 5,2 % (3 сезона из 58 лет).

Из всех событий (58 сезонов) 47 % величины весенних сумм осадков составили значения от 147,0 мм до 199,2 мм; событие с максимальной величиной сумм осадков (229,5 мм) в весенний сезон имело место один раз (1,7 %) за 1961-2018 гг.; минимальная весенняя сумма осадков (105,4 мм) пришлась на 4 сезона за 58 лет, что составило 7 % из всех случаев.

За 58 лет 40 % всех случаев выпавших летних сумм осадков имели величину от 133,8 мм по 188,6 мм. На максимальные (267,6 мм) и минимальные (124 мм) суммы летних осадков пришлось по 7% (по 4 сезона из 58).

Из всех осенних сезонов 64 % суммы осадков имели величину от 145,8 мм по 172,2 мм. На максимальную величину осенних сумм осадков (251,4 мм) и минимальную (66,6 мм) пришлось по 1,7 % (по 1 сезону из 58).

Таким образом, в распределении зимних и весенних сумм осадков имело место левосторонняя асимметрия (с преобладанием значений сумм осадков ниже среднего), при этом осадки в летний и осенний сезоны характеризовались нормальным распределением.

Суточные максимумы осадков. Статистические оценки частотного распределения годовых суточных максимумов осадков за 1961-2018 гг. юг ЕТР приведены в таблице 2, гистограммы годовых суточных максимумов осадков на рис. 3.

Таблица 2

Статистические оценки частотного распределения годовых суточных максимумов осадков за 1961-2018 гг., юг ЕТР

Карман (мм) по возрастанию	Частота (кол-во лет)	Интегральный %	Карман (мм)	Частота (кол-во лет) по убыванию	Интегральный %
31,5	1	1,7%	47,4	15	26%
35,5	5	10,3%	43,4	11	45%
39,4	9	25,9%	39,4	9	60%
43,4	11	44,8%	51,3	9	76%
47,4	15	70,7%	35,5	5	84%
51,3	9	86,2%	55,3	4	91%
55,3	4	93,1%	59,2	4	98%
59,2	4	100,0%	31,5	1	100%

Из таблицы 2 видно, что за 1961-2018 гг. 45 % всех событий годовых суточных максимумов осадков имели величину от 43,4 мм до 47,4 мм. Наибольшее значение годового суточного максимума $P_{max}=59,2$ мм имело место в 7 % случаев (4 события из 58). Наименьшее значение годовых суточных максимумов $P_{max}=31,5$ мм имело место один раз за 58 лет (1,7 %). Так же как в случае с суммами осадков на максимальные значения суточных максимумов годовых осадков приходилось большее количество лет (4 года из 58), чем на минимальные значения годовые суточные максимумы осадки (1 год из 58).

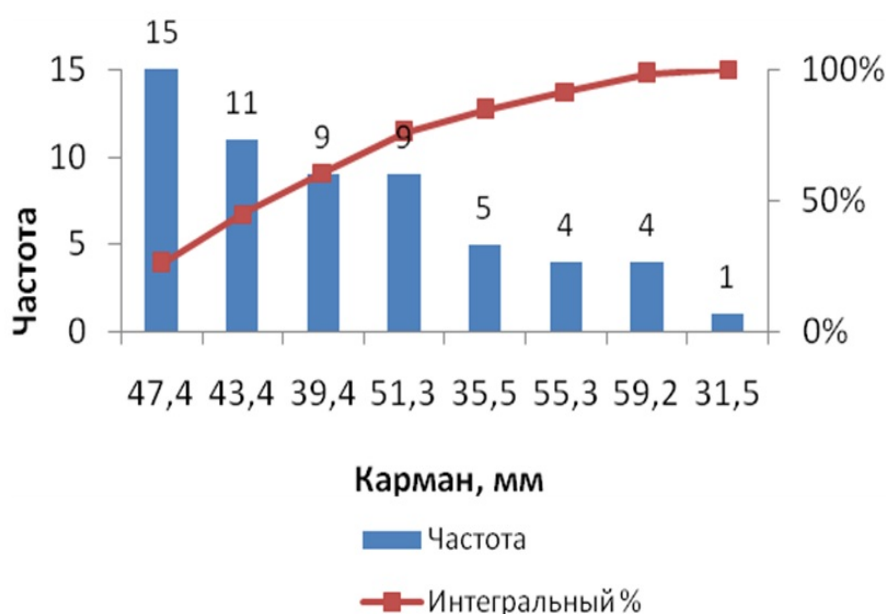


Рисунок 3 – Гистограмма годовых суточных максимумов осадков за 1961-2018 гг.

Перейдя от абсолютной частоты к относительной частоте (%) появления событий с заданной частотой, определим эмпирическую выборочную функцию $F(x)$ как:

$$F(x) = \begin{cases} 1,7\% & \text{при } x = 32 \text{ мм,} \\ 8,6\% & \text{при } x = 36 \text{ мм,} \\ 15,5\% & \text{при } x = 39 \text{ мм,} \\ 19\% & \text{при } x = 43 \text{ мм,} \\ 25,4\% & \text{при } x = 47 \text{ мм,} \\ 15,5\% & \text{при } x = 51 \text{ мм,} \\ 7\% & \text{при } x = 55 \text{ мм,} \\ 7\% & \text{при } x = 59 \text{ мм.} \end{cases} \quad (2)$$

Используя данные формулы (2), построим гистограмму эмпирической функции распределения $F(x)$ годовых суточных максимумов осадков за 58 лет (100 %) (рис. 4), из которой следует, что в каждом четвертом сезоне (25,4 %) величина выпавших годовых суточных максимумов осадков составляла 47 мм.

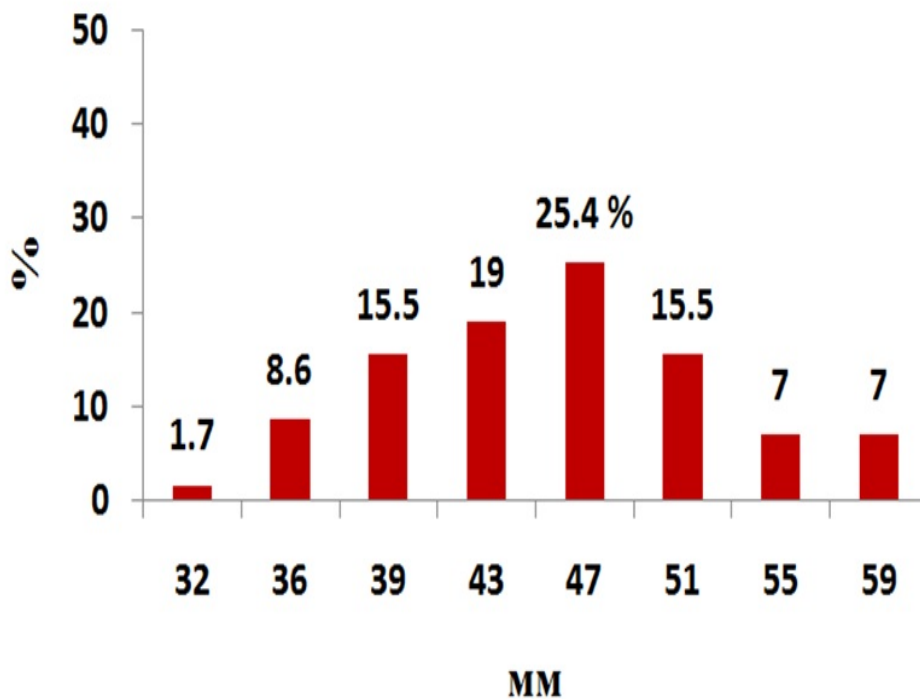


Рисунок 4 – Гистограмма эмпирической функции распределения $F(x)$ годовых суточных максимумов осадков за 1961-2018 гг.

За 1961-2018 гг. 41,4 % всех случаев *зимних* суточных максимумов осадков принимали значения от 18,7 мм до 20,3 мм; наибольшие значения зимних суточных максимумов (23,6 мм) встречались в 10,3 % случаев (6 лет из 58); наименьшие значения (12,3 мм) – в 1,7 % (1 год из 58).

За 58-летний период 47 % всех случаев величина *весенних* суточных максимумов осадков составляла от 25,8 мм до 28,8 мм. Наибольшие значения *весенних* суточных максимумов имели место в 7 % случаев (4 года из 58); наименьшие значения – в 1,7 % случаев (1 год из 58).

За 1961-2018 гг. 48 % всех случаев *летние* суточные максимумы осадков имели величину от 34,4 мм до 37,8 мм. Наибольшие значения летние суточные максимумы (48,12 мм) имели место в 7 % случаев (4 сезона из 58); наименьшие значения (24 мм) – в 1,7 % случаев (1 сезон из 58).

За весь период 1961-2018 гг. в 47 % всех случаев *осенние* суточные максимумы осадков имели величину от 27,9 мм до 31,5 мм; наибольшие значения осенние суточные максимумы (42,4 мм) имели место в 9 % случаев (5 сезона из 58); наименьшее значение (17,0 мм) – в 1,7 % случаев (1 сезон из 58).

В случае с *суточными максимумами осадков* для всех сезонов и в году в целом прослеживается одна и та же закономерность: *наибольшие* значения суточных максимумов за 58 лет повторялись 4-6 раз, в отличие от *наименьших* значений суточных максимумов, имевших место 1 раз за 58 лет.

Число дней с осадками не менее 20 мм (NR20). Статистические оценки частотного распределения числа дней с осадками не менее 20 мм (в году в целом) за 1961-2018 гг. приведены в таблице 3, гистограмма годовых суточных максимумов осадков сумм осадков на рисунке 5.

Таблица 3

Статистические оценки частотного распределения годовых NR20 за 1961-2018 гг., юг ЕТР

Карман (дни) по возрастанию	Частота (кол-во лет)	Интегральный % (накопленный)	Карман (дни)	Частота (кол-во лет) по убыванию	Интегральный % (накопленный)
2,4	1	1,7%	5,8	21	36,2%
3,2	1	1,7%	5,0	13	58,6%
4,1	4	8,6%	6,7	8	72,4%
5,0	13	31,0%	7,6	8	86,2%
5,8	21	67,2%	4,1	4	93,1%
6,7	8	81,0%	8,4	3	98,3%
7,6	8	94,8%	2,4	1	100,0%
8,4	3	100,0%	3,2	0	100,0%

За 1961-2018 гг. 36,2 % (21 год из 58) всех случаев составили *6 дней NR20* и 22,4 % (13 лет из 58) – *5 дней NR20*. Наибольшее количество дней (8,4 дн.) имели место в 5 % случаев (3 года из 58 лет) и 7,6 дня – в 14 % (8 лет из 58). Наименьшее количество (2,4 и 3,2 дня) по 1,7 % (по 1 году из 58). Количество лет с 7-8 днями NR20 за год (11 лет) превышает количество лет с 2-3 днями NR20 за год (2 года) в 5,5 раз.

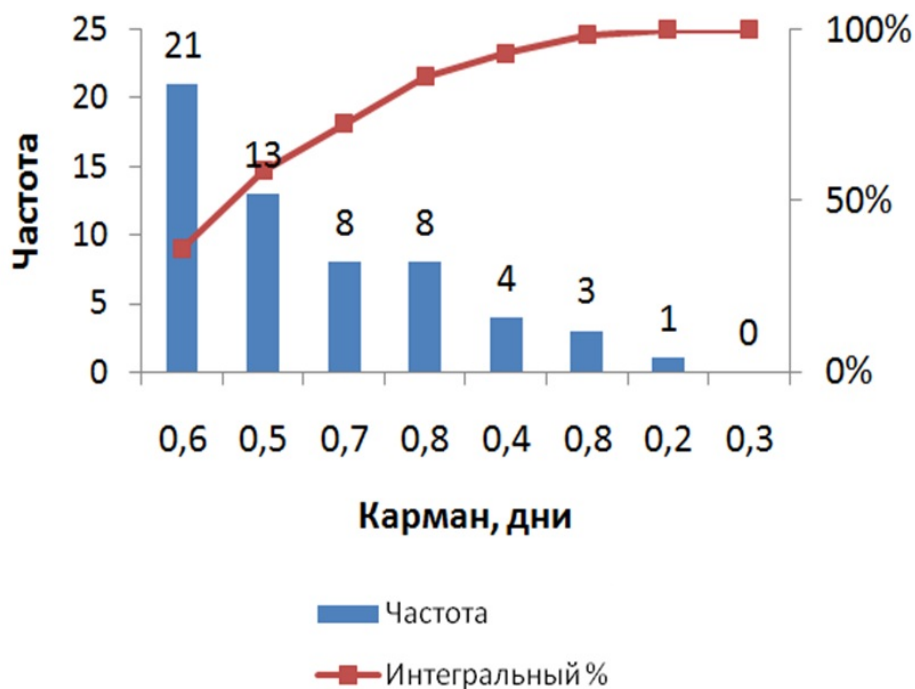


Рисунок 5 – Гистограмма годовых $NR20$ за 1961-2018 гг.

Эмпирическая выборочная функция $F(x)$ годовых $NR20$, полученная по данным таблицы 3, имеет вид:

$$F(x) = \begin{cases} 1,7\% & \text{при } x = 32\text{мм}, \\ 8,6\% & \text{при } x = 36\text{мм}, \\ 15,5\% & \text{при } x = 39\text{мм}, \\ 19\% & \text{при } x = 43\text{мм}, \\ 25,4\% & \text{при } x = 47\text{мм}, \\ 15,5\% & \text{при } x = 51\text{мм}, \\ 7\% & \text{при } x = 55\text{мм}, \\ 7\% & \text{при } x = 59\text{мм}. \end{cases} \quad (3)$$

Используя данные формулы (2), можно построить гистограмму эмпирической функции распределения $F(x)$ годовых $NR20$ (рис. 6).

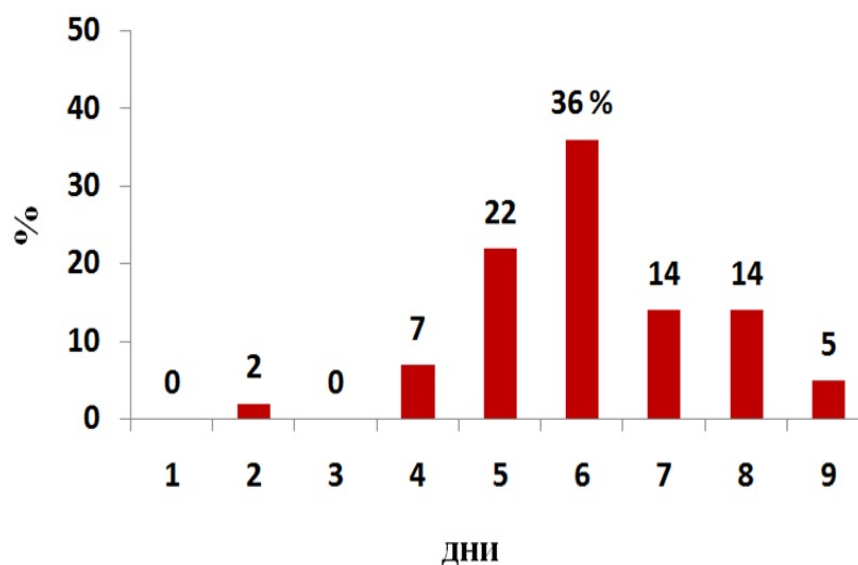


Рисунок 6 – Гистограмма эмпирической функции распределения $F(x)$ годовых $NR20$ за 1961-2018 гг.

Из таблицы 3 и рисунка 6 видно, что наиболее часто в году, 36,2% всех случаев, число дней с осадками не менее 20 мм приходилось на $n=6$ дней. Добавив 22,4% случаев с $n=5$ днями $NR20$, получим, что на юге ЕТР за 58 лет $\approx 60\%$ интенсивных осадков величиной не менее 20 мм приходилось на 5 или 6 дней в году, что близко к результатам исследования перераспределения экстремальных осадков на фоне глобального потепления, представленных в работах [1] и [2].

С 1961 по 2018 гг. событие $NR20$ с $n=1$ днем приходилось на 29 зимних сезонов из 58 лет (50 %). На наибольшее количество числа дней $NR20$ (1,8 дн.) и наименьшее количество $NR20$ (0,3 дн.) пришлось по одному зимнему сезону за 58 лет (по 1,7 %).

В весенние сезоны 1961-2018 гг. 31 % всех событий $NR20$ пришелся на 1 день. Наибольшее количество дней (2,6 дн.) составило 3,4 % случаев (≈ 3 сезона из 58 лет). Наименьшее количество (0,2 дн.) – 1,7 % пришлось на 1 весенний сезон. Разброс дней $NR20$ весной составил от 0,2 до 2,6 дней.

В летние сезоны 1961-2018 гг. 52 % всех случаев $NR20$ пришелся на 2,3 дня. Наибольшее количество $NR20$ (4 дн.) наблюдалось в 10 % случаев (6 летних сезонов из 58 лет). Наименьшее количество $NR20$ (1 дн.) – в 15,52 % случаев (9 летних сезонов из 58), что характеризует тенденцию сокращения дней с ливневыми осадками летом. В летнем сезоне количества дней $NR20$ укладываются в интервал от 1 до 4-х дней, это наибольший разброс сезонных $NR20$.

В осенние сезоны 1961-2018 гг. 33 % всех случаев приходилось на 1,3 дня с осадками не менее 20 мм. Наибольшее (3,8 дн.) и наименьшее (0,3 дн.) количество дней с осадками более 20 мм встречались по 1 сезону за 1961-2018 гг.

В зимний и осенний сезоны наибольшее и наименьшее количество $NR20$ встречается одинаковое число раз; в весенний сезон – превышение наибольшего числа дней $R20$; в летний сезон – превышение наименьшего числа дней $R20$.

Выводы

1. На юге европейской территории России за исследованный период с 1961 по 2018 гг. произошло перераспределение интенсивности и продолжительности осадков: на число событий с *максимальными* значениями *годовых сумм осадков* пришлось большее количество лет (5 лет из 58 лет), чем на события с *минимальными* значениями годовых сумм осадков (1 год из 58).

2. В случае с *суточными максимумами осадков* прослеживалась одна и та же закономерность для *всех сезонов и в году* в целом: число событий с *наибольшими* значениями суточных максимумов осадков за 58 лет повторялось 4-6 раз, в отличие от *наименьших* суточных максимумов, имевших место 1 раз за 58 лет.

3. Количество лет с 7-8 днями *NR20* за год (11 лет) превышало количество лет с 2-3 днями *NR20* за год (2 года) в 5,5 раз.

Таким образом, увеличение продолжительности дождливого периода в году в целом (числа дней с осадками не менее 20 мм) в совокупности с увеличением интенсивности осадков (рост суточного максимума осадков) может составить серьезные риски затопления некоторых регионов юга ЕТР с преобладанием усиления указанных характеристик в *весенний* и *летний* сезоны.

ЛИТЕРАТУРА

1. Trenberth K. E., et al. The changing character of precipitation // Bull. Am. Meteorol. Soc., 2003, vol. 84, pp. 1205–1217; doi:10.1175/BAMS-84-9-1205.
2. Матвеева Т.А., Гущина Д.Ю. и Золина О.Г. Крупномасштабные индикаторы экстремальных осадков в прибрежных природно-экономических зонах европейской территории России // Метеорология и гидрология. 2015. Т. 11. С. 20–32.
3. Pendergrass A.G., Knutti R. The uneven nature of daily precipitation and its change // Geophysical Research Letters, 2018, vol. 45. <https://doi.org/10.1029>.
4. Ashabokov B.A., Tashilova A.A., Kesheva L.A., Taubekova Z.A. Trends in Precipitation Parameters in the Climate Zones of Southern Russia (1961–2011) // Russian Meteorology and Hydrology, 2017, vol. 42, № 3, pp. 150–158.
5. Золина О.Г., Булыгина О.Н. Современная климатическая изменчивость характеристик экстремальных осадков в России // Фундаментальная и прикладная климатология. 2016. Т. 1. С. 84–103.
6. Алешина М.А., Семенов В.А., Чернокульский А.В. Роль глобальных и региональных факторов в изменении экстремальности летних осадков на Черноморском побережье Кавказа по результатам экспериментов с моделью климата // Фундаментальная и прикладная климатология. 2019. Т. 3. С. 59–75.
7. Tashilova A.A., Ashabokov B.A., Kesheva L.A., Teunova N.V. Analysis of climate change in the Caucasus region: the end of the 20th – the beginning of the 21st century // Climate, 2019, 7, 11; doi:10.3390/cli7010011.
8. Ashabokov B.A., Tashilova A.A., Kesheva L.A., Teunova N.V. Study on the Caucasus Region: Crop Model Based on «Slow» Climate Change over the Last 60 Years // Modern Advances in Geography, Environment and Earth Sciences, 2020, vol. 1, chapter 1, pp. 1–21; doi: 10.9734/bpi/magees/v1

9. Исаев А.А. Статистика в метеорологии и климатологии. Москва: Издательство МГУ, 1988. 248 с.

ABSTRACT

On the basis of data from 20 meteorological stations for 1961-2018 of the «basic triad» of precipitation (total, maximum daily precipitation and the number of days with precipitation of at least 20 mm (*NR20*)) for the territory of southern European Russia, a frequency analysis of seasonal and annual precipitation was carried out, a frequency distribution in absolute value, an integral distribution was obtained. The right-sided asymmetry of the empirical distribution function revealed a redistribution of the daily maximum precipitation and *NR20* towards their increase.

Keywords: annual and seasonal precipitation, frequency characteristics, integral characteristics, empirical distribution function, southern Russia.

High-Mountain Geophysical Institute, Nalchik; tashilovaa@mail.ru

© А.А. Tashilova, 2020

АННОТАЦИЯ

На основе рядов «базовой триады» осадков (суммарные, максимальные суточные осадки и число дней с осадками не менее 20 мм (*NR20*)) за 1961-2018 гг., полученных по данным 20 метеорологических станций на территории юга Европейской России, проведен частотный анализ сезонных и годовых осадков, получено частотное распределение по абсолютной величине (*n*), их интегральное распределение (%). Правосторонняя асимметрия эмпирической функции распределения выявила перераспределение годовых суточных максимумов осадков и *NR20* в сторону их увеличения.

Ключевые слова: годовые и сезонные осадки, частотные характеристики, интегральные характеристики, эмпирическая функция распределения, юг России.

ФГБУ «Высокогорный геофизический институт», Нальчик; tashilovaa@mail.ru

© А.А. Ташилова, 2020