

УДК 551.58:511

**КВАНТИЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ЭКСТРЕМУМОВ ОСАДКОВ
НА ЮГЕ ЕВРОПЕЙСКОЙ ЧАСТИ РОССИИ****Ташилова А.А.***ФГБУ «Высокогорный геофизический институт», Нальчик, e-mail: tashilovaa@mail.ru*

В работе приводится анализ динамики сезонных и годовых экстремумов осадков на юге европейской части России (ЕЧР) на основе инструментальных данных 20 метеостанций за период с 1961 по 2018 г. Для выявления количества экстремальных значений осадков на юге России был применен квантильный анализ, определяющий высшие (выше порогового значения) и низшие (ниже порогового значения) значения осадков. По результатам квантильного анализа исследована динамика распределения их количества в базовый (1961-1990 гг.) и современный (1991-2018 гг.) периоды. По результатам исследования наиболее значительный рост экстремальных суточных максимумов с 1991 года имел место в степной и прикаспийской зонах, отличающихся засушливым климатом с наименьшим количеством годовых и сезонных сумм осадков (особенно в прикаспийской зоне). Все полученные экстремальные осадки превышали верхнюю границу нормы (высшие экстремумы), за исключением двух случаев, когда были низшие экстремумы: весенние суммы осадков в 2003 г. на предгорной м/станции «Ставрополь» и летние суммы осадков в 1998 г. в Терсколе (высокогорье). Получено, что во всех климатических зонах юга европейской части России наблюдался рост количества экстремальных сумм осадков с 37% в базовый период до 63% в современный период и рост количества экстремальных суточных максимумов с 42% до 58%. Получено, что количество высших экстремумов сумм осадков и суточных максимумов на юге ЕЧР увеличилось примерно в 1,5 раза в современный период.

Ключевые слова: сумма осадков, суточный максимум осадков, климатический экстремум, квантильный анализ, высшие экстремумы, низшие экстремумы

**QUANTILE ANALYSIS OF PRECIPITATION EXTREMES IN THE SOUTH
OF THE EUROPEAN PART OF RUSSIA****Tashilova A.A.***High Mountain Geophysical Institute, Nalchik, e-mail: tashilovaa@mail.ru*

The paper analyzes the dynamics of seasonal and annual precipitation extremes in the south of the European part of Russia (EPR) based on instrumental data from 20 meteorological stations for the period 1961 – 2018 was carried out. For the current amount of extreme precipitation values, a quantile analysis was applied to determine the highest (above the threshold) and lowest (below the threshold) precipitation values. Based on the results of the quantile analysis, the dynamics of the distribution of their number in the base (1961-1990) and modern (1991-2018) periods were investigated. According to the results of the study, the most significant increase in extreme daily maximums since 1991 took place in the steppe and Caspian zones, characterized by an arid climate with the lowest amount of annual and seasonal precipitation (especially in the Caspian zone). All received extreme precipitation exceeded the upper limit of the norm (highest extrema), with the exception of two cases when the lowest extrema have been: spring precipitation totals in 2003 at the foothill m/station Stavropol and summer precipitation totals in 1998 in Terskol (highlands). An increase in the amount of extreme daily precipitation in the base period from 37% up to 63% in the modern period and an increase in the amount of extreme daily precipitation from 42% to 58%. It was found that the number of the highest extremes of precipitation sums and daily maximums in the south of the EPR increased by about 1.5 times in the modern period.

Keywords: total precipitation, daily maximum precipitation, climatic extremum, quantile analysis, highest extremes, lowest extremes

В «Климатической доктрине Российской Федерации» говорится, что изменение климата является одной из важнейших международных проблем XXI века, выходящих за рамки научной проблемы [1]. Следствием изменения климата становятся экстремальные явления, которые можно обнаружить по изменениям в распределении рядов и частоте их появления [2]. Современные климатические изменения проявляются, помимо изменений средних величин (медленное изменение), в резком изменении частоты и интенсивности экстремальных климатических событий как температуры, так и осадков, приводящих к засухам или наводнениям [3–5]. За последние 7 лет

на территории юга России произошло несколько катастрофических наводнений. В работе [6] авторы на основе данных метеонаблюдений Средиземноморья и Причерноморья за последние 30–40 лет и при помощи составленной ими климатической модели пришли к выводу о том, как глобальное потепление и стабильный рост температур воздуха и морской воды влияли на региональный климат. Дестабилизация системы ветров над Черным морем летом 2012 г. и особое стечение других климатических факторов привели в тот сезон к тому, что уровень осадков на юго-восточном Черноморье вырос на 300%, то есть в три раза. Причиной этого было то, что

теплая вода на поверхности моря заметно быстрее испаряется и увеличивает долю воды в атмосфере на очень большие значения – на 20% и более. При определенных обстоятельствах они будут очень быстро подниматься в тропосферу, концентрироваться и выпадать в виде очень мощных локальных осадков.

Цель исследования – выявление экстремальных величин осадков на юге европейской части России и динамика распределения их количества.

Материалы и методы исследования

Для исследования изменения режима осадков были использованы данные 20 м/станций государственной наблюдательной сети Росгидромета, предоставленные Северо-Кавказским управлением гидрометеорологической службы (СК УГМС). Климатический экстремум – это достижение метеорологической или климатической переменной значения, которое выше (ниже) некоторого порога, близкого к верхнему (или нижнему) диапазону наблюдаемых значений переменной [2]. Как отмечено в [7], определение экстремальных осадков является очень сложной проблемой, так как это определение может быть различно для разных задач и для разных географических районов. В работе приводится анализ трех основных методологических подходов к их определению: 1) анализ абсолютных значений; 2) использование порогового квантиля, определяемого из функций плотности вероятности; и 3) анализ продолжительности периодов с непрерывными осадками. В работах [8; 9] встречаются и другие способы определения экстремальных осадков. Общие определения включают 99-й и 95-й процентиля на все влажные дни (иногда встречается 90-й процентиль). При исполь-

зовании менее экстремальных определений, таких как 90-й или 95-й процентиль, величина увеличения в ответ на потепление меньше, чем при более экстремальных определениях (Pendergrass, 2018), реагируя скорее как среднее количество осадков, чем как экстремальное [9].

Для исследования экстремальности рядов осадков в настоящей работе использовался квантильный метод, реализованный в статистической программе SPSS 21.0. Для получения экстремальных значений необходимо преобразовать исходный ряд $x_1, x_2, x_3, \dots, x_p, x_n$ в ранжированный ряд вида $x_1 > x_2 > x_3 > \dots > x_i > x_n$. Обозначим медиану (50% квантиль) x_{50} , значения 25% и 75% квантилей как x_{25} и x_{75} , выбросы $S_{1.5}$ и экстремумы $S_{3.0}$.

Тогда аномальные элементы (выбросы $\Delta_{1.5}$, экстремумы $\Delta_{3.0}$) рассчитываются как

$$\Delta_{1.5} = 1,5x \text{ от } |x_{75} - x_{25}| \quad (1)$$

$$\Delta_{3.0} = 3,0x \text{ от } |x_{75} - x_{25}| \quad (2)$$

Для каждого значения выбросов и экстремумов рассчитывают пороговые значения

$$S^* = \begin{cases} S_{1.5}, & \text{если } x_i > (x_{75} + \Delta_{1.5}) \\ S_{3.0}, & \text{если } x_i > (x_{75} + \Delta_{3.0}) \end{cases} \quad (3)$$

$$S^* = \begin{cases} S_{1.5}, & \text{если } x_i < (x_{25} - \Delta_{1.5}) \\ S_{3.0}, & \text{если } x_i < (x_{25} - \Delta_{3.0}) \end{cases} \quad (4)$$

Результат примера расчета экстремумов осадков с помощью квантильного анализа представлен в табл. 1 и на рис. 1. Как видно, имеется один выброс, удовлетворяющий условию (3), для $n = 12$ (порядковый номер в ряде максимальных суточных). Экстремумы, удовлетворяющие условию (4), отсутствуют.

Таблица 1

Процентили

	5%	10%	25%	50%	75%	90%	95%
Максимальные суточные осадки, мм	5,6	6,0	8,0	11,0	16,0	19,8	23,0

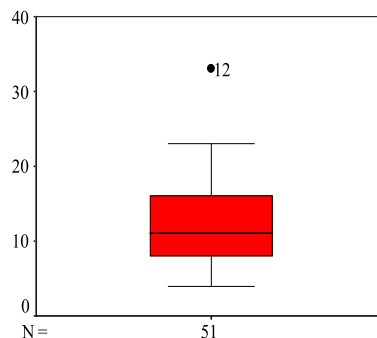


Рис. 1. Коробчатая диаграмма

Значения осадков, превышающие верхний порог, назовем «верхними» экстремумами, их количество обозначим $nUExt$ (upper-extremes), а значения ниже нижнего порога – «нижними» экстремумами, соответственно $nLExt$ (lowest-extremes) – количество «нижних» сезонных и годовых экстремумов, то есть число дней со значениями осадков (выбросы, экстремумы) ниже рассчитанного порогового значения для данного ряда. В «Резюме МГЭИК» (2014) [1] рекомендовано определять пороговые значения экстремальных температур для каждого сезона как 5-й и 95-й процентиля для полной выборки суток этого сезона. Вычисления экстремумов по квантилям и процентилям показали идентичность результатов.

Результаты исследования и их обсуждение

По результатам квантильного анализа были выявлены высшие экстремумы осадков и проведена их систематизация по сезонам, климатическим зонам и подпериодам исследования. Динамика количества экстремумов осадков в различных климатических зонах юга ЕЧР представлена на рис. 2 и в табл. 2. Из табл. 2 следует, что при сравнении зимнего и осеннего сезонов 1961–1990 гг. и 1991–2018 гг. имел место значительный рост количества высших экстремумов сумм осадков (25% : 75% зимой и 34% : 66% осенью). Вклад в полученное соотношение внесли экстремумы сумм осадков равнинной (40% : 60% зимой и 38% : 62% осенью), предгорной (29% : 71% зимой и 33% : 67% осенью) и горной (0 : 100% зимой и 25% : 75%

осенью) зон. В весенний сезон соотношение количества экстремумов сумм осадков в базовый и современный периоды оставалось постоянным (50% : 50%) во всех зонах. В летний сезон количество экстремальных сумм осадков в современный период незначительно снижалось (52% : 47%).

В причерноморской зоне (Сочи) наблюдалась тенденция уменьшения экстремумов сумм осадков и сохранения количества суточных максимумов. В летний сезон наиболее катастрофичными были ливневые осадки с суточным максимумом 245 мм в августе 1971 года, 136 мм в июне 1988 г., 162 мм в июне 1997 г. и 114 мм в июне 2015 г. (среднее за 1961–2018 гг. 72 мм). В осенний сезон все осадки с суточным максимумом > 140 мм имели место в сентябре разных лет: 1975 г., 1989 г., 2009 г. (среднее за 1961–2018 гг. 73 мм).

В работе [10] отмечено, что в 2003 году в Ставрополе (предгорье) был выявлен нижний экстремум суммы осадков, чье значение меньше нижнего порога ≤ 23 мм (весенний сезон). В 2003 г. весенняя сумма осадков составила 23 мм (март – 2 мм, апрель – 17 мм, май – 4 мм), что значительно меньше среднего значения суммы осадков 147 мм, а также климатической нормы 141 мм, что характеризует эту весну как экстремально засушливую.

В горной зоне основной вклад в увеличение количества экстремумов сумм осадков внесли *зимние* (0% : 100%) и *осенние* (25% : 75%) сезоны, количество экстремумов суточных максимумов не изменилось в современный период по сравнению с базовым.

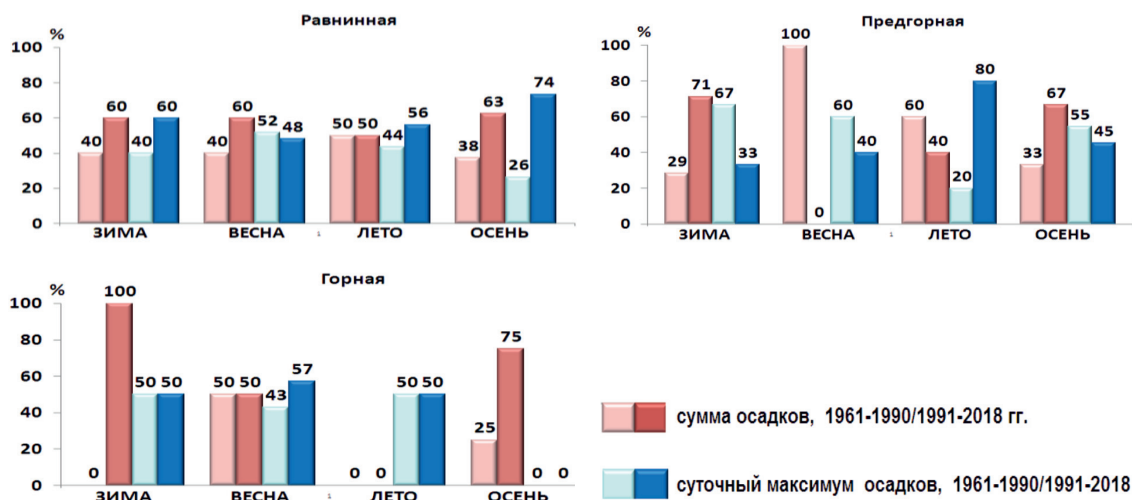


Рис. 2. Динамика изменения количества высших экстремумов осадков (%) на юге ЕЧР, 1961–2018 гг.

Таблица 2

Динамика (%) экстремумов сезонных сумм осадков и суточных максимумов

Климатические зоны	Количество экстремумов сумм осадков, n (%)		Количество экстремумов суточных максимумов осадков, n (%)	
	1961-1990 гг.	1991-2018 гг.	1961-1990 гг.	1991-2018 гг.
зима				
I. Равнина, из них:	4 (40%)	6 (60%)	8 (40%)	12 (60%)
Причерноморье	1	0	1	1
степная	1	2	4	2
Прикаспий	2	4	3	9
II. Предгорье	2 (29%)	5 (71%)	4 (67%)	2 (33%)
III. Горная	0 (0%)	7 (100%)	1 (50%)	1 (50%)
По всем зонам	6 (25%)	18 (75%)	13 (47%)	15 (53%)
весна				
I. Равнина, из них:	2 (33%)	4 (67%)	14 (52%)	13 (48%)
Причерноморье	0	0	1	1
степная	0	2	7	7
Прикаспий	2	2	6	5
II. Предгорье	1 (100%)	0 (0%)	6 (60%)	4 (40%)
III. Горная	1 (100%)	0 (0%)	3 (43%)	4 (57%)
По всем зонам	4 (50%)	4 (50%)	23 (52%)	21 (48%)
лето				
I. Равнина, из них:	5 (50%)	5 (50%)	14 (44%)	18 (56%)
Причерноморье	1	0	1	1
степная	2	3	5	8
Прикаспий	2	2	8	9
II. Предгорье	3 (60%)	2 (40%)	2 (20%)	8 (80%)
III. Горная	0 (0%)	0 (0%)	2 (50%)	2 (50%)
По всем зонам	8 (53%)	7 (47%)	18 (39%)	28 (61%)
осень				
I. Равнина, из них:	6 (38%)	10 (62%)	9 (26%)	25 (74%)
Причерноморье	1	0	0	0
степная	1	7	6	18
Прикаспий	4	3	3	7
II. Предгорье	3 (33%)	6 (67%)	6 (55%)	5 (45%)
III. Горная	1 (25%)	3 (75%)	0 (0%)	0 (0%)
По всем зонам	10 (34%)	19 (66%)	15 (31%)	30 (69%)
год				
I. Равнина, из них:	17 (41%)	24 (59%)	45 (40%)	68 (60%)
Причерноморье	3 (100%)	0 (0%)	3 (50%)	3 (50%)
степная	4 (22%)	14 (78%)	22 (39%)	35 (61%)
Прикаспий	10 (43%)	13 (57%)	20 (33%)	41 (67%)
II. Предгорье	9 (41%)	13 (59%)	18 (49%)	19 (51%)
III. Горная	2 (15%)	11 (85%)	6 (46%)	7 (54%)
Все зоны юга ЕЧР	28 (37%)	48 (63%)	69 (42%)	94 (58%)

Все высшие экстремальные значения сумм осадков высокогорной станции Терскол (с превышением порогового значения) распределены равномерно по всем сезонам: по 2 зимой (>445 мм в 1963 г., 1987 г.), весной (>426 мм в 2004 г., 2005 г.), летом (>437 мм в 1967 г., 1996 г.), и 3 – осенью (>470 мм в 1972 г., 1989 г., 1992 г.). Имеется 1 низший экстремум сумм осадков со значением ниже порогового <141 мм летом 1998 г. (июнь –

56 мм, июль – 61 мм, август – 24 мм) при климатической норме N = 302 мм.

Годовое количество экстремумов сумм осадков выросло: в степной зоне с 22% до 78%, в прикаспийской зоне с 43% до 57%. Количество экстремумов суточных максимумов также возросло: с 39% до 61% (степная зона), с 33% до 67% (прикаспийская зона). По результатам нашего исследования, наиболее значительный рост экстре-

мальных суточных максимумов имел место в степной и прикаспийской зонах, отличающихся засушливым климатом с наименьшим количеством годовых и сезонных сумм осадков (особенно в прикаспийской зоне). Возможно, это объясняется изменением направления движения циклонических воздушных масс, приносящих осадки в прикаспийскую зону, с горизонтального переноса воздушных масс на вертикальный перенос, преобладающий в регионах.

При сравнении зимнего и осеннего сезонов 1961–1990 гг. и 1991–2018 гг. на юге ЕЧР имел место значительный рост количества высших экстремумов сумм осадков (25% : 75% зимой и 34% : 66% осенью). В весенний сезон соотношение количества экстремумов сумм осадков в базовый и современный периоды оставалось постоянным (50% : 50%) во всех зонах. В летний сезон произошло незначимое уменьшение количества экстремальных сумм осадков

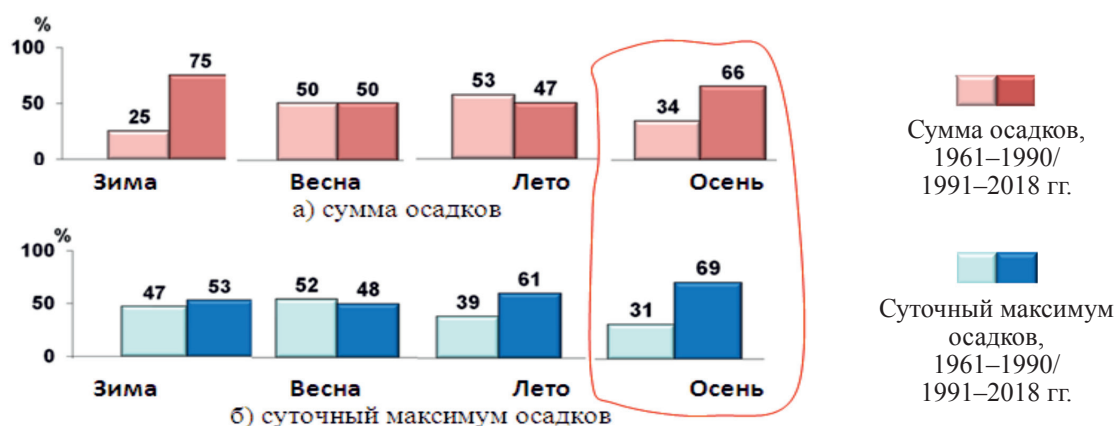


Рис. 3. Динамика (%) высших экстремумов сезонных осадков на юге ЕЧР

Из результатов исследования динамики экстремумов осадков по сезонам (рис. 3) следует, что на юге ЕЧР в *осенний* сезон в современный период 1991–2018 гг. по сравнению с базовым 1961–1990 гг. выросло как количество экстремальных сумм осадков (34% : 66%), так и суточных максимумов (31% : 69%). В *зимний* сезон увеличилось количество экстремальных сумм осадков (без экстремумов суточных максимумов), а в *летний* сезон – количество экстремальных суточных максимумов. В *весенний* сезон на территории юга ЕЧР соотношение количества сумм осадков в базовый и современный периоды оставалось постоянным.

Заключение

Таким образом, все полученные экстремальные осадки превышали верхнюю границу нормы (высшие экстремумы), за исключением двух случаев, когда экстремумы были ниже порогового значения (низшие экстремумы): весенние суммы осадков в 2003 г. на предгорной м/станции «Ставрополь» и летние суммы осадков в 1998 г. в Терсколе (высокогорье).

с 53% до 47%, что на фоне статистически значимого роста средних летних температур (0,47 °/10 лет) может создать условия для засухи на юге ЕЧР.

В целом за год наблюдался рост количества экстремальных сумм осадков с 37% в базовый период до 63% в современный период и рост количества экстремальных суточных максимумов с 42% до 58%. Таким образом, количество высших экстремумов сумм осадков и суточных максимумов на юге ЕЧР увеличилось примерно в 1,5 раза в современный период по сравнению с базовым.

Список литературы / References

1. Климатическая доктрина Российской Федерации от 17.12.2009 г. № 861-рп. [Электронный ресурс]. URL: <http://www.kremlin.ru/acts/6365> (дата обращения: 22.10.2021).
2. IPCC, 2014: Appendix II: Glossary [Mack, C.J., C. Planton and C. von Stechow (editors)]. In: Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Main Authors: R.K. Pachauri and L.A. Meyer (Editors)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 2014. P. 133–148.
3. Алешина М.А., Семенов В.А., Чернокульский А.В. Роль глобальных и региональных факторов в изменении экс-

тремальности летних осадков на Черноморском побережье Кавказа по результатам экспериментов с моделью климата // *Фундаментальная и прикладная климатология*. 2019. Т. 3. С. 59–75.

Aleshina M.A., Semenov V.A., Chernokulsky A.V. The role of global and regional factors in the change in the extremeness of summer precipitation on the Black Sea coast of the Caucasus based on the results of experiments with a climate model // *Fundamental'naya i prikladnaya klimatologiya*. 2019. Vol. 3. P. 59–75 (in Russian).

4. Базелок А.А. Опасные гидрометеорологические явления на юге европейской территории России // *Природные и социальные риски в береговой зоне Черного и Азовского морей*. М.: Триумф, 2012. С. 33–41.

Bazelyuk A.A. Hazardous hydrometeorological phenomena in the south of the European territory of Russia // *Natural and social risks in the coastal zone of the Black and Azov seas*. M.: Triumph, 2012. P. 33–42 (in Russian).

5. Ташилова А.А. Статистические оценки частотного распределения «базовой триады» осадков на юге России // *Доклады Адыгской (Черкесской) Международной Академии Наук*. 2020. № 2. С. 47–57.

Tashilova A.A. Statistical estimates of the frequency distribution of the «basic triad» of precipitation in the south of Russia // *Doklady Adygskoy (Cherkesskoy) Mezhdunarodnoy Akademii Nauk*. 2020. № 2. P. 47–57 (in Russian).

6. Meredith E.P., Semenov V.A., Maraun D., Park W., Chernokulsky A.V. Crucial role of Black Sea warming in amplifying the 2012 Krymsk precipitation extreme. *Nature Geoscience*. Nature Publishing Group (United Kingdom). 2015. Vol. 8. No. 8. P. 615–619.

7. Zolina O.G., Kapala A., Simmer C., Gulev S.K. Analysis of extreme precipitations over Europe from different reanalyses: a comparative assessment. *Global and Planetary Change*. 2007. Vol. 44. P. 129–161.

8. IPCC, 2012. *Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation*, Edition: Chapter 3 Changes in climate extremes and their impacts on the natural physical environment, Publisher: Cambridge University Press. The Edinburgh Building, Shaftesbury Road, Cambridge CB2 8RU ENGLAND. Editors: Field C.B., Barros V., Stocker T.F., Qin D., Dokken D.J., Ebi K.L., Mastrandrea M.D., Mach K.J., Plattner G.-K., Allen S.K., Tignor M., and Midgley P.M. 2012. 582 p.

9. Pendergrass A.G. What precipitation is extreme? *Science*. 2018. Vol. 360. No. 6393. P. 1072–1073.

10. Пшихачева И.Н. Сравнительный комплексный анализ и прогноз режима осадков в различных климатических зонах юга России: дис. ... канд. физ.-мат. наук. Нальчик, 2014. 219 с.

Pshikhacheva I.N. Comparative comprehensive analysis and forecast of precipitation regime in different climatic zones of southern Russia: dis. ... kand. fiz.-mat. nauk. Nal'chik, 2014. 219 p. (in Russian).