

ГОДИШНИК НА СОФИЙСКИ УНИВЕРСИТЕТ “СВ. КЛИМЕНТ ОХРИДСКИ”
ГЕОЛОГО-ГЕОГРАФСКИ ФАКУЛТЕТ
Книга 2 – ГЕОГРАФИЯ
Том 115-116

ANNUAL OF SOFIA UNIVERSITY “ST. KLIMENT OHRIDSKI”
FACULTY OF GEOLOGY AND GEOGRAPHY
Book 2 – GEOGRAPHY
Volume 115-116

МНОГОГОДИШНА ДИНАМИКА НА РЕЧНИЯ ОТТОК ВЪВ ВОДОСБОРИТЕ ЗАПАДНО ОТ РЕКА ОГОСТА

КАЛИН СЕЙМЕНОВ

Катедра Климатология, хидрология и геоморфология

Kalin Seymenov. ANNUAL FLOW DYNAMICS IN THE CATCHMENTS WEST OF THE OGOSTA RIVER

Estimating long-term discharge variability is an important scientific task for hydrology in the face of climate change. This study describes annual flow dynamics, fluctuations, and trends at eight gauging stations distributed over seven catchments in Northwestern Bulgaria. The length of the time-series data varies from 57 to 75 years between 1946 and 2020. Descriptive statistical features: minima, maxima and means, standard deviation, and coefficient of variation (C_v), as well as double mass curve and non-parametric criteria for checking homogeneity and randomness of the time-series data, were applied in the first phase of the work. Oscillations and tendencies in annual runoff were assessed using different techniques – moving average values, integral difference curves, flow duration curves, and linear trends. Preliminary testing using double mass curves and non-parametric criteria reveals that the time-series data are not homogeneous and do not follow a normal distribution. The log-normal theoretical distribution, which approximates the empirical data, was accepted. Results show that the mean annual runoff decreases after 1985, while the values of C_v increase. The moving average values and integral difference curves show an alternation of wet and dry years without clearly pronounced cyclicity. A statistically significant negative trend in annual flow volumes was observed during the reporting period. This work enriches past studies with new findings for a recent period.

Keywords: annual streamflow, flow dynamics, catchments west of the Ogosta River

УВОД

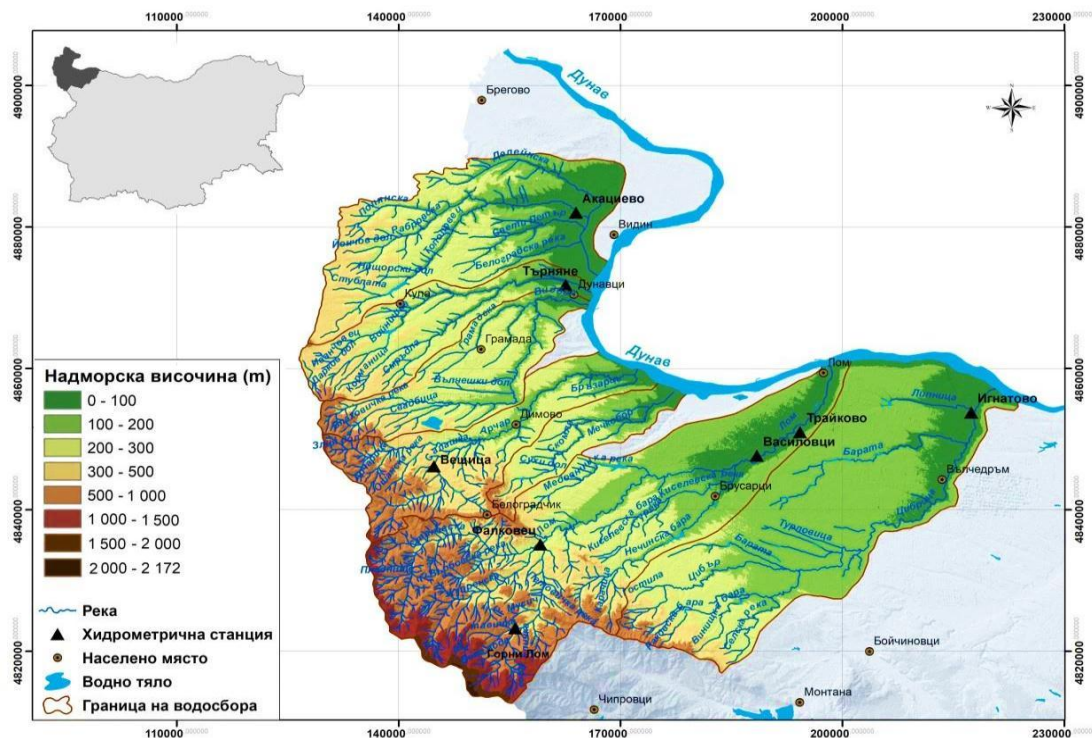
Изучаването на многогодишната изменчивост на речния отток в условията на глобално затопляне и промени в разпределението на валежите представлява една от най-предизвикателните изследователски задачи, пред които е изправена съвременната хидрология. Редица автори установяват тенденция към намаляване на водните обеми в реките както в световен мащаб (Banasik *et al.*, 2012, Shengzhi *et al.*, 2015, Umar *et al.*, 2018, Arslan *et al.*, 2020, Zhong *et al.*, 2021, Xu *et al.*, 2022), така и на територията на България (Lizama-Rivas & Koleva-Lizama, 2005, Artinyan *et al.*, 2021). В северозападната

част на страната са развити малки и средни по дължина и площ на водосборната област реки, които са по-чувствителни към измененията на климата в сравнение с обширните поречия, и следователно целенасоченото им изучаване допринася за детайлизиране на локалния отговор на хидроложките системи към входните въздействия. Годишният речен отток в района е с негативен тренд на изменение, а водните ресурси са уязвими към засушаване (Димитров, 2018).

В посочения контекст, целта на настоящото изследване е анализ и оценка на многогодишните отточни вариации, колебания и тенденции в речните водосбори западно от р. Огоста. Изпълнението на поставената цел се очаква да разшири и обогати досегашните знания по темата с нови факти за съвременен период.

ИЗСЛЕДВАНА ТЕРИТОРИЯ

Изследването обхваща северозападната част на България, където в участъка заключен между р. Дунав (на север), речния басейн на р. Тимок (на запад и югозапад) и поречието на р. Огоста (на изток и югоизток) са развити водосборите на реките Тополовец, Войнишка, Видбол, Арчар, Скомля, Лом и Цибрица – десни притоци на р. Дунав (фиг. 1). Площта на района в посочените граници е 3790 km² (Христова, 2012).



Фигура 1 Карта на релефа, речната мрежа и хидрометричните станции във водосборите западно от р. Огоста (Hristova *et al.*, 2017)

Figure 1 Map of the relief, drainage network and gauging stations in the catchment areas west of the Ogosta River (Hristova *et al.*, 2017)

Изучаваните речни басейни включват части от три физикогеографски области – Западна Стара планина (Светиниколски и Чипровски дял), Западен Предбалкан (Връшка чука, Бабин нос, Рабишка могила, Венеца, Ведерника, Широка планина и Белотински зъбер) и Западна Дунавска равнина (фиг. 1). Главните реки започват своите течения от ридовете и планините на Предбалкан – р. Тополовец от Връшка чука (692.0 m), реките Войнишка, Видбол и Арчар от Бабин нос (1107.4 m), р. Скомля от Белоградчишки Венец (903.6 m) и р. Цибрица от Широка планина (940.8 m) с надморска височина на изворите между 404 m (р. Тополовец) и 1060 m (р. Арчар) и географски координати от 43.395° до 43.833° с.ш. и от 22.382° до 22.954° и.д. (табл. 1). Изключение е р. Лом, която извира от Чипровска Стара планина (2168 m) на надморска височина 2100 m (табл. 1). След изворите речните течения насочват водите си на североизток и се вливат отдясно в р. Дунав. Устията на реките Тополовец, Войнишка и Видбол се намират във Видинската низина, на реките Арчар и Скомля – в Арчаро-Орсойската низина, а на р. Цибрица – в Цибърската низина на надморска височина между 27 m (р. Цибрица) и 33 m (р. Тополовец) и географски координати от 43.797° до 43.936° с.ш. и от 22.839° до 23.526° и.д. Основните хидрографски характеристики – дължина и водосборна площ, отнасят главните реки към класове „средни“ до „средно големи“ по дължина и „средни“ до „средно големи“ по площ на водосборната област (Христова, 2003) (табл. 1).

Таблица 1

Table 1

Хидрографски данни за реките и водосборните басейни западно от р. Огоста (Христова, 2012)
Hydrographic data about the rivers and catchment areas west of the Ogosta River (Hristova, 2012)

Река	L (km)	F (km ²)	Географски координати и надморска височина					
			Извор			Устие		
			X (°E)	Y (°N)	H (m)	X (°E)	Y (°N)	H (m)
Тополовец	67.6	582.8	22.382	43.833	404	22.851	43.936	33
Войнишка	55.2	276.3	22.401	43.766	664	22.842	43.914	32
Видбол	61.8	329.8	22.407	43.718	998	22.839	43.898	29
Арчар	59.4	365.4	22.406	43.716	1060	22.927	43.820	30
Скомля	41.6	162.8	22.690	43.646	560	22.993	43.797	29
Лом	92.5	1139.8	22.682	43.395	2100	23.249	43.836	28
Цибрица	87.5	933.6	22.954	43.474	818	23.526	43.814	27

Изследваният район се отличава с умереноконтинентални климатични условия. Средногодишната температура на въздуха нараства от 4–5°C (в Западна Стара планина) до 11–12°C (по крайбрежието на р. Дунав). Годишните валежи се повишават от 500–550 mm в крайдунавските низини (527 mm, ст. Лом) до 1000–1500 mm в старопланинската част (1321 mm, резерват „Чупрене“) (Климатичен справочник, 1990, План за управление

на резерват „Чупрене“, 2014). Годишната температура на въздуха е с позитивен тренд на изменение през последните десетилетия. За периода 1984–2013 г. нарастването на годишната температура на въздуха по дунавското крайбрежие е с от 0.3°C до 0.6°C на всеки десет години (Николова и др., 2016). Според сценарий MPI 8.5 тенденцията към затопляне се очаква да се задълбочи и в средносрочен (2021–2050 г.) и дългосрочен (2051–2080 г.) план темпът на нарастване на годишната температура на въздуха да се повиши до 0.9°C на всеки десет години (Николова и др., 2016). Статистически значим положителен тренд на изменение на годишната температура на въздуха в климатичната станция във Видин за периода 1961–2010 г. установява Димитров (2018), според който затоплянето е най-силно изразено след 1985 г. и придава уязвимост на водните ресурси към засушаване. Констатирани тенденции намират потвърждение в реалистичните и песимистичните климатични сценарии (RCP 4.5 и RCP 8.5), които показват нарастване на средногодишната температура на въздуха в Дунавски район с 1.08°C и 1.44°C (през 2021–2050 г.) и с 2.79°C и 3.85°C (през 2071–2100 г.) спрямо 1976–2005 г. (ПУРБ, 2016–2021). Годишните валежни суми не следват еднозначен и статистически значим тренд, което се доказва от трудовете на Manea *et al.* (2010) и Димитров (2018), отнасящи се за различни времеви интервали. Климатичните сценарии сочат противоречиви изменения. Песимистичният вариант RCP 8.5 прогнозира спад с 0.22% (през 2013–2042 г.) и ръст с 0.62% (през 2021–2050 г.), докато реалистичният модел RCP 4.5 допуска ръст съответно с 4.27% и 1.93% на годишните валежи в Дунавски район спрямо 1976–2005 г. Снежна покривка се образува ежегодно, задържа се 45–60 дни (в Западна Дунавска равнина) и 120–160 дни (в Западна Стара планина) с най-голяма продължителност през м. януари, с максимална височина 65 cm и с тенденция към намаляване стойностите на посочените показатели (Петкова, 2014). Климатичните сценарии предсказват спад на височината на снежната покривка в Дунавски район с 6.3% (RCP 2.6) и 22.4% (RCP 8.5) през 2071–2100 г. спрямо 1976–2005 г. (ПУРБ, 2016–2021). Повишаването на температурата на въздуха в съчетание с понижаването на височината на снежната покривка предполага намаляване на водните обеми в реките.

ИЗХОДНА ИНФОРМАЦИЯ И МЕТОДИ НА ИЗСЛЕДВАНЕ

Основа на настоящия анализ са изходни данни от опорната хидрометрична мрежа на Национален институт по метеорология и хидрология (НИМХ) относно измерените годишни стойности на речния отток при осем хидрометрични станции (ХМС) (табл. 2).

Таблица 2
Table 2

Информация за хидрометричните станции и продължителността на наблюденията
Hydrometric information about the gauging stations and duration of study periods

№ на ХМС	Река – ХМС	F (km ²)	Н _{ср.} (m)	Гъстота на речна мрежа (km/km ²)	Среден наклон на река (‰)	Период с хидрометрични наблюдения
12700	Тополовец – с. Акациево	305.0	250	0.56	6.5	1952–2011
12850	Войнишка – с. Търняне	269.0	260	0.64	12.7	1946–2020
13450	Салашка – с. Вещица	86.3	584	–	45.1	1947–2020
14450	Стакевска – с. Фалковец	325.0	680	0.93	31.8	1960–2020
14620	Лом (Бърза) – с. Горни Лом	19.3	1411	1.80	116.2	1954–2020
14700	Лом – с. Горни Лом	107.4	1185	1.58	107.4	1946–2020
14840	Лом – с. Василовци	1087.0	442	0.67	18.7	1959–2020
15850	Цибрица – с. Игнатово	845.0	193	0.31	7.4	1951–2007

Източник: Хидрологичен справочник на реките в НР България (1981)

Реките Тополовец, Войнишка и Цибрица са оборудвани с по един водочет. Четири водомерни поста регистрират водните количества на р. Лом и притока ѝ р. Стакевска. Не е организирана опорна хидрометрична мрежа в поречието на р. Арчар, но водомерен пункт е изграден на притока ѝ р. Салашка. Реките Видбол и Скомля не са осветени от регулярни хидрометрични наблюдения (табл. 2).

Данните за годишните стойности на оттока са получени за периода от откриване на хидрометричните станции до 1975 г. от „Хидрологичен справочник – том 2“ (1981) и са допълнени със сведения до 1983 г. от хидрологични годишници. Времеви редове са удължени с оригинални записи за периода от 1984 г. до 2020 г., осигурени от НИМХ. Изключение са ХМС № 12700 и № 15850, за които последната налична информация се отнася за 2011 г. и 2007 г. поради закриване на водомерните постове и преустановяване на наблюденията. Оформените времеви серии са с дължина от 57 години (р. Цибрица – с. Игнатово) до 75 години (р. Войнишка – с. Търняне и р. Лом – с. Горни Лом). Прагова стойност за определяне на продължителността на изчислителния период в изследването е непревишението от 5–10% на средноквадратичната грешка на многогодишния ред.

Анализът на дългосрочната отточна динамика се основава на последователност от статистически стъпки и процедури за оценка на хомогенността, репрезентативността, вероятностния модел, цикличността и тенденциите на времеви редове от данни.

Хомогенността е тествана с двойносумарната крива, получена чрез кумулативно натрупване на членовете на извадката (ако процесът е хомогенен, графиката е права линия) и с непараметричните критерии на Pettit's, Buishand, von Neumann's и Standard Normal Homogeneity Test (SNHT). Тестовите на Anderson-Darling, Lilliefors, Jarque-Bera и Shapiro-Wilk са приложени за оценка на модела на вероятностното разпределение.

Тестването на нулевата хипотеза, според която времевите серии са хомогенни и се подчиняват на нормалното разпределение, е извършено чрез задаване на критичен праг на значимост $\alpha = 0.05$ и област на допустимите резултати в интервала: $p\text{-value} \geq \alpha$.

Тенденциите в изменението на годишния отток са изследвани чрез линеен тренд. При съсредоточаване на точките около линия е пресметнато уравнението на регресия, описващо наклона на изравнителната линия към абсцисата (начертана по метода на най-малките квадрати). Статистическата значимост на тренда е оценена с непараметричния тест Mann Kendall (1975). Нулевата хипотеза, според която времевите редове не следват еднозначен и статистически значим тренд, е тествана със задаване на критичен праг на значимост $\alpha = 0.05$ и област на допустимите резултати: $p\text{-value} \geq \alpha$.

Емпиричната крива на обезпеченост, въз основа на която са определени сериите от многоводни ($P \leq 25\%$), средноводни ($25\% < P < 75\%$) и маловодни ($P \geq 75\%$) години, е изчислена по следната формула (1):

$$P(m) = \frac{m-0.3}{n+0.4} \cdot 100 \% , \quad (1)$$

където: P – обезпеченост, m – пореден номер на членовете във вариационния ред, n – брой на членовете в редицата

Многогодишните отточни колебания са изследвани с пълзящата средна стойност при четиригодишна стъпка на осредняване, определена по израза (2):

$$Q_t = \frac{Q_1 + 2Q_2 + Q_3}{4}, \quad (2)$$

където: Q_1, Q_2, \dots, Q_i – стойностите на годишния речен отток

Прилагането на този метод е свързано с частична загуба на информация и не дава възможност за категорични изводи при времеви серии с по-кратка продължителност на наблюденията (Христова, 2010).

За идентифициране на цикличност в многогодишните колебания на речния отток е начертана крива на интегралните разлики, получена чрез преобразуване на изходния времеви ред по следната формула (3):

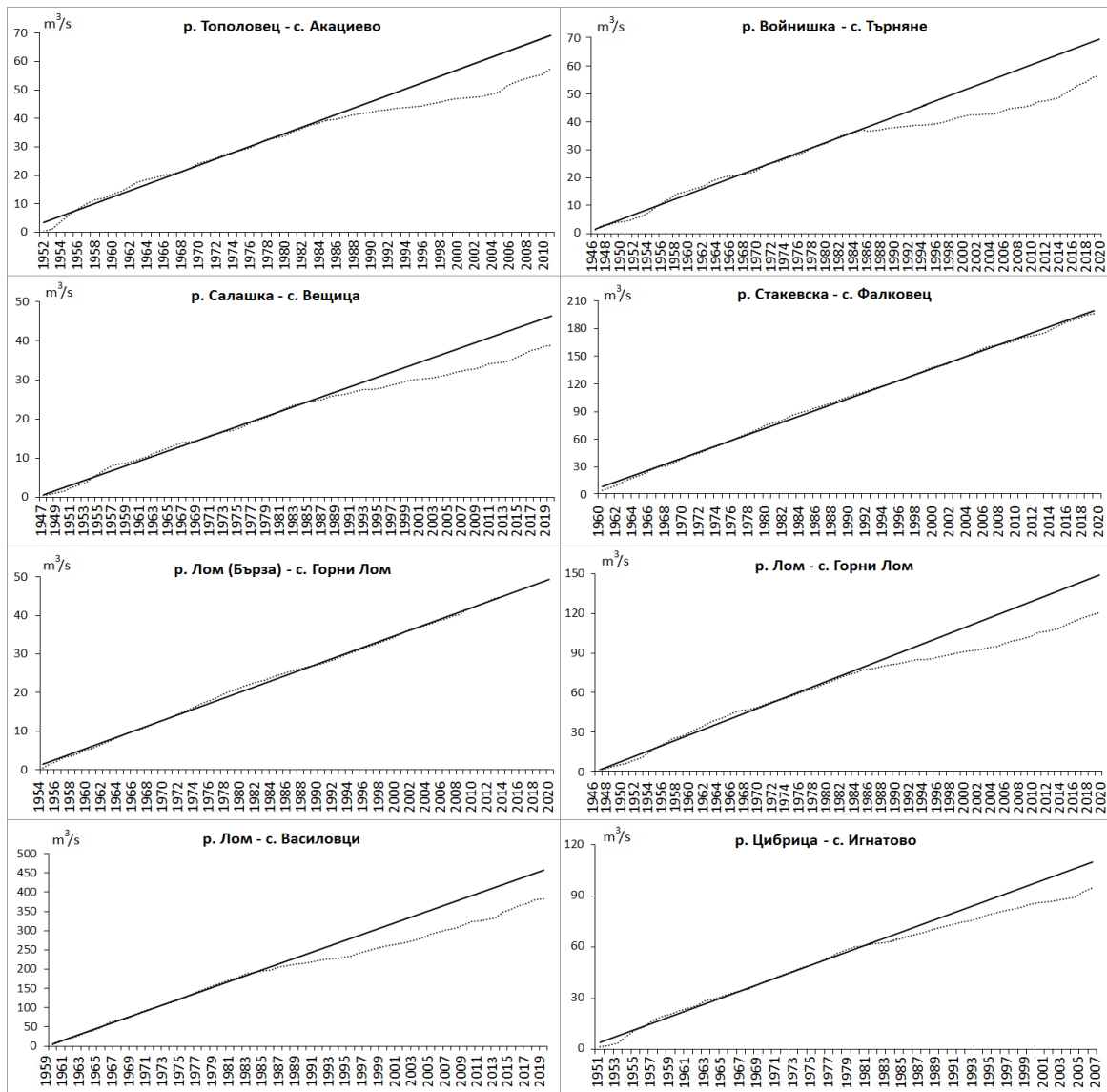
$$f(t) = \sum_{i=1}^n (K_i - 1) / Cv, \quad (3)$$

където: $K_i = \frac{x_i}{\bar{x}}$ – модул coefficient

Чрез кривите на интегралните разлики се анализира синхронността в многогодишните отточни колебания между отделните речни водосбори (Хидрологичен наричник, 1980).

РЕЗУЛТАТИ

Проверката за хомогенност на времевите серии от стойности на годишния отток чрез приложените непараметрични тестове разкрива, че повечето изследвани редици са със статистически значима нееднородност, което се потвърждава от двойносомарните криви, показващи времето на промяна в хидроложкия запис (фиг. 2, табл. 3).



Фигура 2 Двойносомарни криви на годишния отток във водосборите западно от р. Огоста
Figure 2 Double-mass curves of annual streamflow in the catchments west of the Ogosta River

Еднородността на времевите серии се нарушава около средата на 80-те години на ХХ в. (между 1983 г. и 1987 г. за отделните речни водосбори) – промяна, констатирана и от Кирилова (2019). Доколкото няма данни за увеличаване на антропогенния натиск върху изследваните хидроложки системи след втората половина на 80-те години на ХХ в., причината за нарушената еднородност следва да се търси в измененията на климата

и в промените на начините за събиране и обработване на хидрометричната информация. От 1982 г. започва продължителен период на хидроложко засушаване в редица части на България, особено в северозападните, южните и югозападните водосбори (Герасимов и Божилова, 2003, Герасимов и др., 2004, Христова и др., 2020, Кирилова, 2022), в т.ч. в изследваните поречия (Димитров, 2018). Към посоченото обстоятелство се прибавят и промените на методите и апаратурата за извършване на хидрометричните наблюдения и измервания в страната след 80-те години на XX в. (Ангелов, 2021).

Таблица 3
Table 3

Резултати от непараметричните тестове за хомогенност и тип на разпределението
Results of the non-parametric criteria for homogeneity and type of distribution

ХМС	Тестове за хомогенност				Тестове за тип на разпределението			
	Pettit's	Buishand	Neumann	SNHT	Anderson-Darling	Lilliefors	Jarque-Bera	Shapiro-Wilk
12700	0.012	0.010	0.003	0.031	0.029	0.052	0.055	0.016
12850	0.013	0.012	0.001	0.032	0.025	0.047	0.053	0.016
13450	0.023	0.025	0.012	0.037	0.179	0.282	0.299	0.083
14450	0.079	0.091	0.064	0.089	0.128	0.346	0.418	0.068
14620	0.084	0.076	0.072	0.081	0.255	0.756	0.581	0.134
14700	0.012	0.018	0.007	0.010	0.033	0.042	0.069	0.024
14840	0.025	0.021	0.003	0.017	0.037	0.039	0.072	0.030
15850	0.038	0.027	0.012	0.018	0.042	0.074	0.102	0.045

Получените резултати дават основание многогодишният период да бъде поделен на два подпериода (с условно ненарушен и нарушен отток), които съдържат еднородни данни¹ и имат приблизително еднаква дължина (табл. 4).

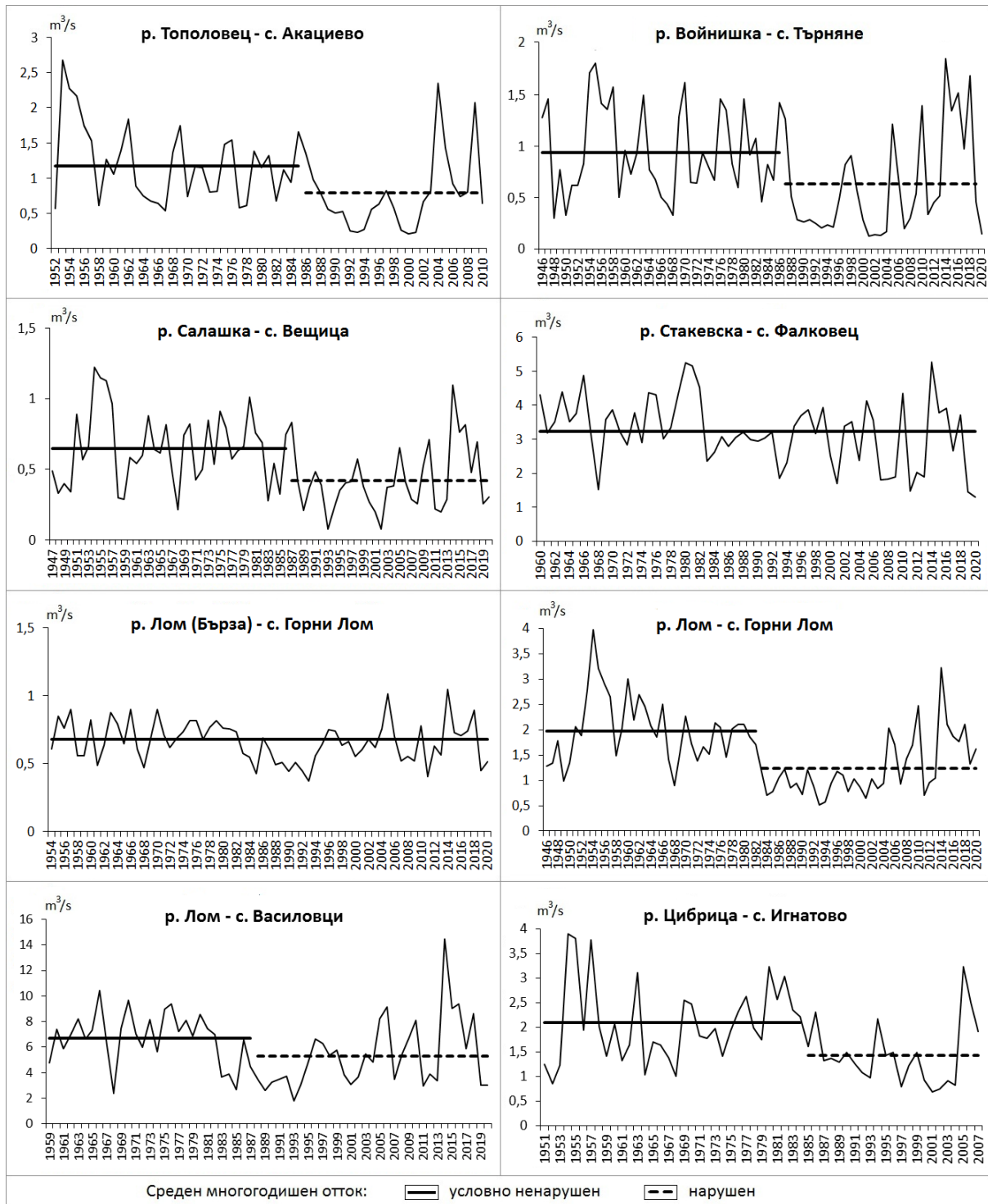
Таблица 4
Table 4

Описателна статистика на годишния речен отток във водосборите западно от р. Огоста
Descriptive statistics of annual streamflow in the catchments west of the Ogosta River

Река – ХМС	Условно ненарушен отток					Нарушен отток				
	Период	Q _{min.} (m ³ /s)	Q _{av.} (m ³ /s)	Q _{max.} (m ³ /s)	C _v	Период	Q _{min.} (m ³ /s)	Q _{av.} (m ³ /s)	Q _{max.} (m ³ /s)	C _v
Тополовец – Акациево	1952–1985	0.49	1.17	2.68	0.47	1986–2011	0.21	0.79	2.35	0.69
Войнишка – Търняне	1946–1985	0.30	0.94	1.81	0.45	1986–2020	0.13	0.63	1.86	0.81
Салашка – Вещица	1947–1986	0.22	0.65	1.22	0.38	1987–2020	0.08	0.42	1.09	0.54
Стакевска – Фалковец	1960–2020	1.29	3.23	5.28	0.30	–	–	–	–	–
Лом (Бърза) – Г. Лом	1954–2020	0.37	0.68	1.05	0.22	–	–	–	–	–
Лом – Горни Лом	1946–1983	0.90	1.98	3.98	0.33	1984–2020	0.52	1.24	3.22	0.48
Лом – Василовци	1959–1987	2.36	6.72	10.44	0.29	1988–2020	1.78	5.32	14.43	0.50
Цибрица – Игнатово	1951–1984	0.86	2.09	3.89	0.38	1985–2007	0.68	1.43	3.23	0.44

¹ Проверката за хомогенност е направена по същата методика, но резултатите не са публикувани.

Намаляването на годишния речен отток през втория изчислителен подпериод се проследява, наред с двойносумарните криви, и в хронологичния ход на водните обеми – свидетелство за изменение на климатичните условия в границите на речните водосбори (фиг. 3).



Фигура 3 Среден многогодишен отток във водосборите западно от р. Огоста
 Figure 3 Mean annual streamflow in the catchments west of the Ogosta River

Въз основа на подпериодите са изчислени и представени описателните статистически характеристики на годишния речен отток (табл. 4). Изключение от общата картина са водосборите на р. Стакевска – с. Фалковец и р. Лом (Бърза) – с. Горни Лом, за които се установява хомогенност на времевите редове от данни – не се регистрират отклонения при двойносумарните криви и резултатите от непараметричните тестове са в областта на допустими значения (фиг. 2, табл. 3), което позволява описателните статистически характеристики на годишния отток да бъдат изчислени за целия многогодишен период.

Средноквадратичната грешка на средномногогодишната стойност на речния отток за всички времеви редове е под 5–10%, което дава основание за изчислителен период в изследването да бъде определен наличният набор от хидрометрична информация.

Резултатите от непараметричните тестове за тип на вероятностното разпределение показват, че времевите серии от годишни стойности на речния отток на р. Салашка – с. Вещица, р. Стакевска – с. Фалковец и р. Лом (Бърза) – с. Горни Лом се подчиняват на нормалното разпределение (стойностите на *p-value* попадат в областта на допустимите значения по всички критерии), докато в останалите водосбори нормално разпределение е удовлетворено по един или два от критериите, което е основание за отхвърлянето на нулевата хипотеза (табл. 3). Лог-нормални теоретични разпределения, апроксимиращи емпиричните са възприети за времевите редове от годишни стойности на речния отток в басейните на р. Тополовец – с. Акациево, р. Войнишка – с. Търняне, р. Лом – с. Горни Лом, р. Лом – с. Василковци и р. Цибрица – с. Игнатово с риск от погрешно отхвърляне на алтернативната хипотеза в случай, че е вярна между 31.7% и 95.4%. Инструментът Chi-squared (критерий χ^2) потвърждава получените резултати – *p-value* > α : 0.317 (р. Лом – с. Василковци) и 0.954 (р. Цибрица – с. Игнатово). Параметърът на лог-нормалното теоретично разпределение (μ) е с максимална стойност 1.711 (стандартна статистическа грешка ≤ 0.052 и вероятностна функция –145.413).

Предварителният анализ установява, че времевите редове от хидроложки данни са представителни и могат да бъдат изследвани с методите на математическата статистика.

Средногодишният речен отток за подпериода с ненарушени условия е в границите между 0.65 m³/s (р. Салашка – с. Вещица) и 6.72 m³/s (р. Лом – с. Василковци) при малки стандартни грешки на средноаритметичната стойност и малка до умерена вариабилност на годишните водни количества – коефициентът на вариация (C_v) е в интервала от 0.22 (р. Бърза – с. Горни Лом) до 0.47 (р. Тополовец – с. Акациево), което свидетелства за относително постоянство на оттокообразуващите условия, особено в планинската част на речните водосбори. Получените резултати са аналогични с данните в „Хидрологичен

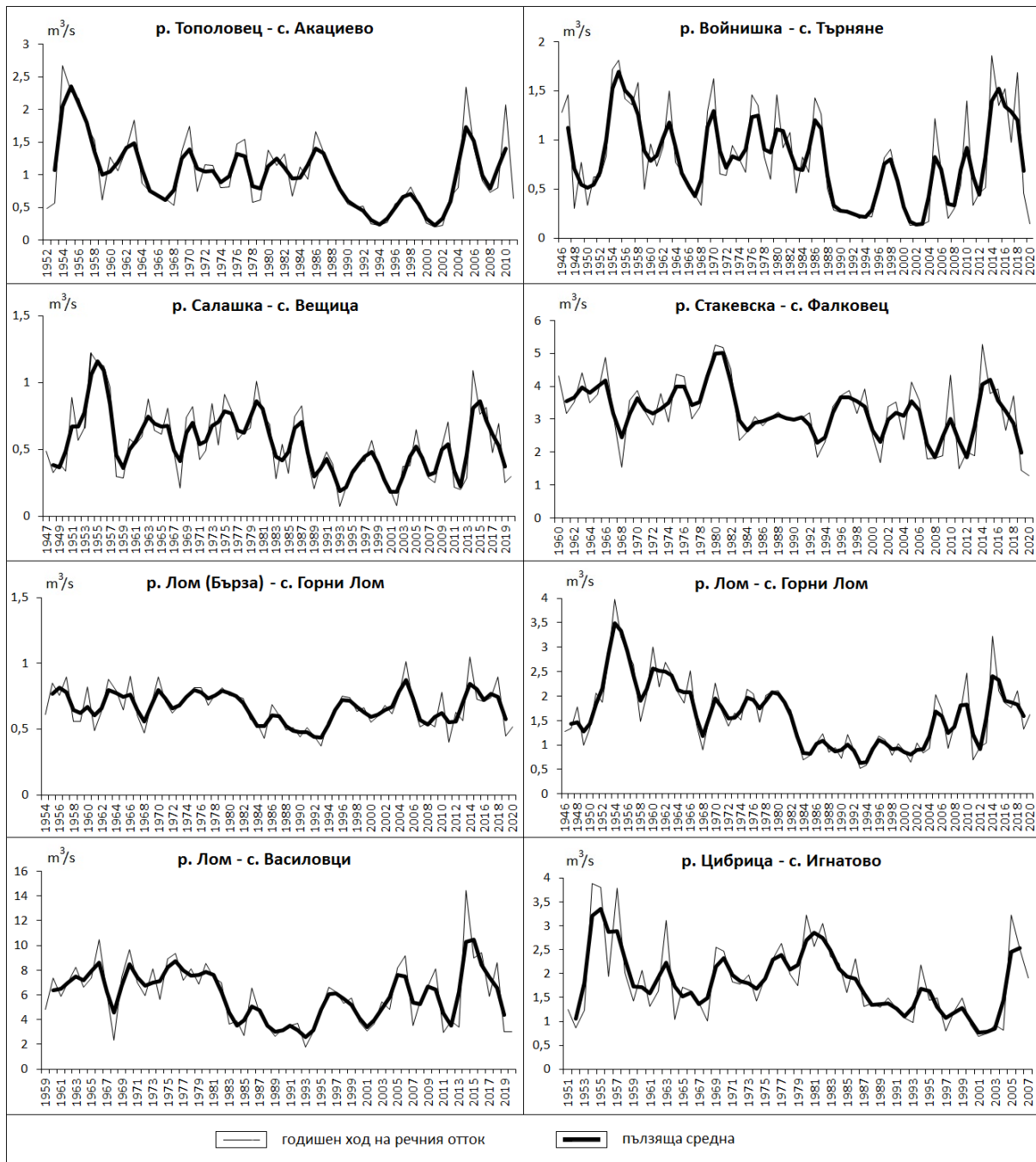
справочник...“ (1982), които разкриват следната информация: C_v между 0.32 (за целия водосбор на р. Лом) и 0.47 (за речния басейн на р. Войнишка). Средногодишните водни количества намаляват след средата на 80-те години на XX в. във всички водосбори с нарушени отточни условия и са в интервала между $0.42 \text{ m}^3/\text{s}$ (р. Салашка – с. Вещица) и $5.32 \text{ m}^3/\text{s}$ (р. Лом – с. Василковци) (фиг. 3, табл. 4), което е показателно за изменение на оттокообразувания комплекс. Времеви серии от годишни стойности на речния отток увеличават вариабилността си в сравнение с цитираните по-горе – C_v се изменя между 0.44 (р. Цибрица – с. Игнатово) и 0.81 (р. Войнишка – с. Търняне).

Значителните флуктуации на нарушения годишен отток се потвърждават и от голямата амплитуда между крайните (минимални и максимални) водни обеми (табл. 4). Граничните стойности на нарушения отток на р. Войнишка – с. Търняне варират от $0.13 \text{ m}^3/\text{s}$ (2001 г.) до $1.86 \text{ m}^3/\text{s}$ (2014 г.), а на ненарушения речен отток се изменят в по-тесен числов диапазон – $0.30 \text{ m}^3/\text{s}$ (1948 г.) и $1.81 \text{ m}^3/\text{s}$ (1955 г.). Сходен е резултатът за р. Лом – с. Василковци: съответно $1.78 \text{ m}^3/\text{s}$ (1993 г.) и $14.43 \text{ m}^3/\text{s}$ (2014 г.) спрямо $2.36 \text{ m}^3/\text{s}$ (1968 г.) и $10.44 \text{ m}^3/\text{s}$ (1966 г.) (табл. 4), което показва непостоянство на оттокообразуващите условия и косвено свидетелства за по-честа проява на екстремни хидроложки събития след 80-те години на XX в.

Хронологичните колебания на годишния речен отток съвпадат с установените за територията на цялата страна (Пенчев и др., 1971, Мандаджиев, 1989, Христова и др., 2018). Анализът на пълзящите средни стойности и на кривите на интегралните разлики откроява сходство в проявата на позитивни и негативни цикли в многогодишния ход на речния отток: за повечето хидрометрични станции се регистрира период на повишена водност в средата на 50-те години на XX в. (с най-големи водни обеми между 1953 г. и 1957 г.), поредица средноводни години през 60-те и 70-те години (с изключение на маловодната 1968 г.), негативен цикъл между 1982 г. и 2004 г. (прекъснат от няколко средноводни години) и разнопосочна отточна динамика след 2005 г. (фиг. 4, фиг. 5).

При така очерталите се отточни колебания е налице няколкогодишен многоводен период и по-продължителен маловоден цикъл с нееднакво начало и край в отделните водосбори. Преобладават годините с речен отток под средната многогодишна стойност спрямо тези с воден обем над нормата – съответно 36 и 24 (р. Тополовец – с. Акациево), 48 и 27 (р. Войнишка – с. Търняне), 44 и 30 (р. Салашка – с. Вещица), 31 и 30 (р. Стакевска – с. Фалковец), 35 и 32 (р. Бърза – с. Горни Лом), 44 и 31 (р. Лом – с. Горни Лом), 32 и 30 (р. Лом – с. Василковци), 34 и 23 (р. Цибрица – с. Игнатово).

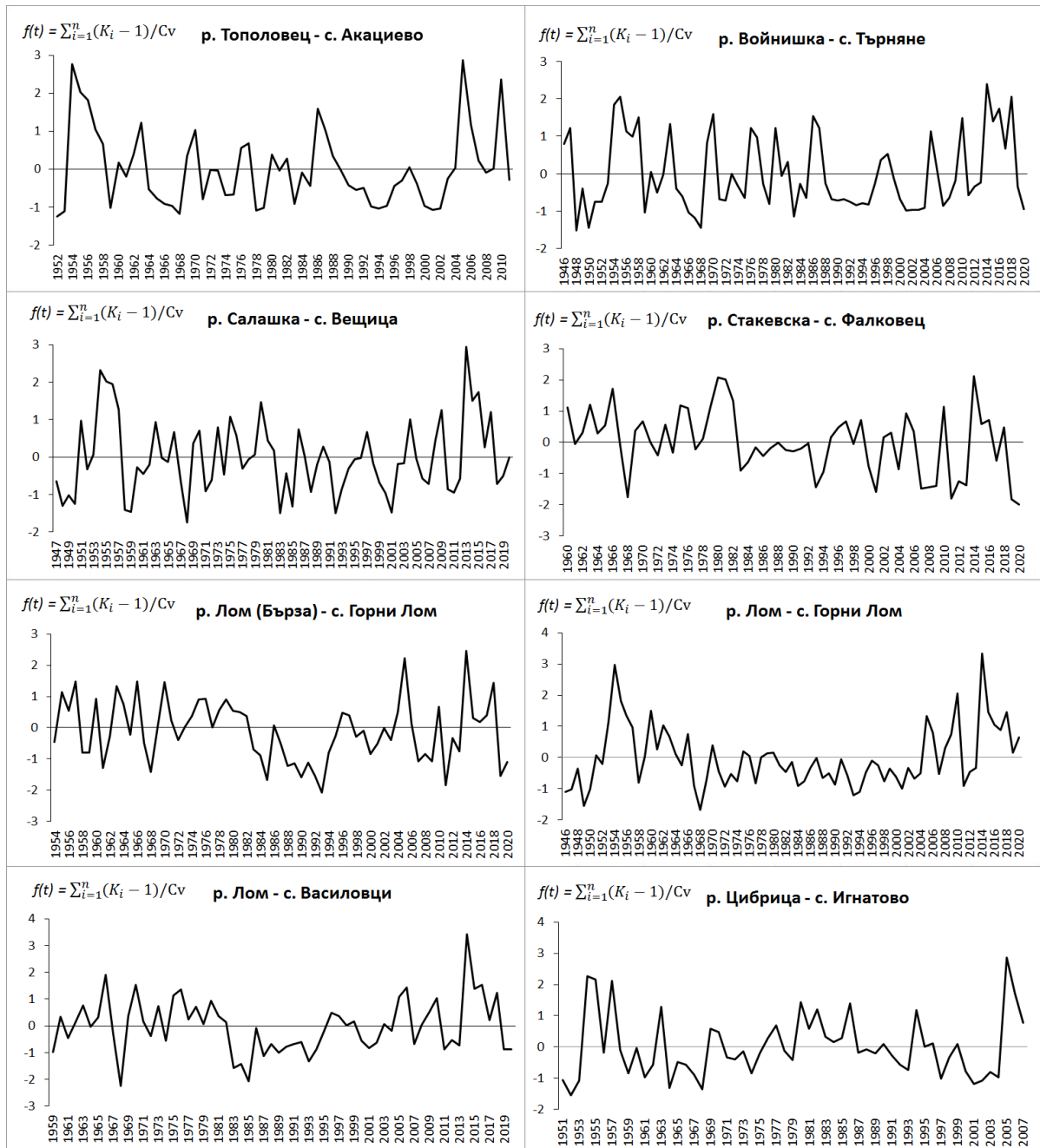
Първият позитивен цикъл започва през 1953 г. и завършва през 1957 г. с най-високи стойности през 1954 г., когато във водосборите на р. Тополовец – с. Акациево, р. Салашка – с. Вещица, р. Лом – с. Горни Лом и р. Цибрица – с. Игнатово се отчитат абсолютните отточни максимуми за целия многогодишен период (фиг. 4). Между 1958 г. и 1981 г. се редуват преобладаващо средноводни години с речен отток около нормата без определена синхронност или закономерност в тяхната проява.



Фигура 4 Многогодишен ход и пълзящи средни стойности на речния отток във водосборите западно от р. Огоста

Figure 4 Long-term dynamics and moving average values of annual streamflow in the catchments west of the Ogosta River

Посоченото твърдение се потвърждава от проверката за цикличност чрез кривата на интегралните разлики, която показва несъгласуваност в многогодишната отточна динамика за отделните речни басейни през посочения времеви интервал (с изключение на многоводните 1963 г., 1970 г. и 1980 г. и на маловодната 1968 г., които се проявяват синхронно във всички изследвани водосбори) (фиг. 5).



Фигура 5 Криви на интегралните разлики на годишния речен отток във водосборите западно от р. Огоста

Figure 5 Integral difference curves of annual streamflow in the catchments west of the Ogosta River

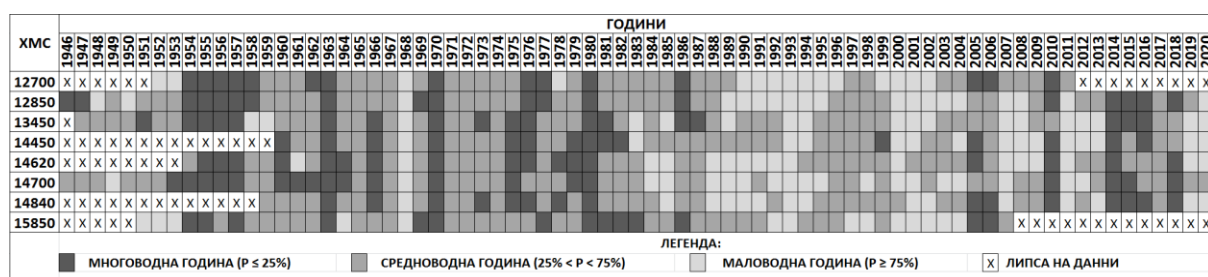
По-голям синхрон в колебанията на речния отток е налице през продължителния 23-годишен негативен цикъл между 1982 г. и 2004 г., когато в почти всички водосбори се регистрират абсолютните отточни минимума за целия многогодишен период. Най-суха в поречието на р. Лом е 1993 г., когато се формира най-малкият воден обем и при р. Салашка – с. Вещица, за разлика от р. Тополовец – с. Акациево, р. Войнишка – с. Търняне и р. Цибрица – с. Игнатово, при които най-суха е 2001 г., подобно на повечето речни басейни в страната (Христова и Иванова, 2017). Границите на продължителния маловоден цикъл варират незначително в отделните поречия – между 1983 г. и 2003 г. с кратко прекъсване от 1986 г. до 1988 г. (за р. Тополовец – с. Акациево), между 1982 г. и 2004 г. с два периода на повишена водност – от 1986 г. до 1987 г. и от 1997 г. до 1998 г. (за р. Войнишка – с. Търняне), между 1983 г. и 2004 г. с прекъсване от 1986 г. до 1988 г. и през 1998 г. (за р. Салашка – с. Вещица), между 1983 г. и 2003 г. с отток над нормата през 1986 г. и от 1996 г. до 1997 г. (за р. Бърза – с. Горни Лом), между 1983 г. и 2004 г. с прекъсване от 1996 г. до 1999 г. (за р. Лом – с. Василковци) и между 1987 г. и 2004 г. с краткотрайно повишена водност от 1994 г. до 1996 г. и през 1999 г. (за р. Цибрица – с. Игнатово). Непрекъснат е маловодният цикъл единствено в речния басейн на р. Лом – с. Горни Лом, където от 1981 г. до 2004 г. се регистрира устойчив 24-годишен период на понижена водност (фиг. 5). След 2005 г., без изразена цикличност и при значителна вариабилност на водните количества, синхронно се редуват многоводни, средноводни и маловодни години в съответствие с многогодишните отточни колебания за територията на цялата страна (Христова и др., 2018). В повечето изследвани поречия през посочения времеви интервал се регистрират петгодишен период на повишена водност от 2014 г. до 2018 г., две самостоятелни многоводни години – 2005 г. и 2010 г., както и две групи с две и три последователни маловодни години – между 2011 г. и 2013 г. и от 2019 г. до 2020 г. През 2014 г. се отчитат абсолютните отточни максимуми за целия многогодишен период в речните басейни на р. Войнишка – с. Търняне, р. Стакевска – с. Фалковец, р. Лом (Бърза) – с. Горни Лом и р. Лом – с. Василковци, а през 2020 г. се установяват най-малките водни обеми в поречието на р. Стакевска – с. Фалковец. Нееднаквите години, през които се регистрират граничните стойности на оттока потвърждават различията в оттокообразуващите условия за отделните части на изследвания район.

Резултатите от ранжирането на речния отток и разпределението му през годините по водност са показани на табл. 5 и фиг. 6, и в значителна степен съвпадат с изведените за територията на цялата страна серии от многоводни и маловодни години, определени по данни от емпирични криви за периода 1931–2003 г. (Лазаров и др., 2004).

Таблица 5
Table 5

Годишен речен отток по реда на обезпеченост във водосборите западно от р. Огоста
Wet and dry years arranged by the annual flow volumes in the catchments west of the Ogosta River

Река – ХМС	Многоводни години (по реда на обезпеченост $P \leq 25\%$)	Маловодни години (по реда на обезпеченост $P \geq 75\%$)
Тополовец – с. Акациево	1954, 2005, 1955, 1956, 2010, 1963, 1957, 1970, 1986, 1977, 1958, 1976, 2006, 1962, 1980	2001, 1994, 2002, 1993, 2000, 1995, 1952, 1991, 1992, 1968, 1996, 1990, 1953, 1978, 1999
Войнишка – с. Търняне	2014, 1955, 1954, 2018, 1970, 1958, 2016, 1963, 1947, 1976, 1980, 1986, 1956, 2010, 1957, 1977, 2015, 1969, 1946	2001, 2003, 2002, 2020, 2004, 2007, 1993, 1995, 1994, 1992, 1990, 1989, 1991, 2000, 2008, 1948, 1968, 1950, 2011
Салашка – с. Вещица	1954, 1955, 1956, 2014, 1980, 1957, 1975, 1951, 1963, 1973, 1987, 1970, 2016, 1966, 1976, 2015, 1981, 1986	1993, 2002, 2001, 2012, 1989, 1968, 2011, 1994, 2019, 2008, 2000, 1983, 2007, 2013, 1959, 1958, 2020, 1985
Стакевска – с. Фалковец	2014, 1980, 1981, 1966, 1982, 1963, 1975, 2010, 1979, 1960, 1976, 2005, 1999, 2016, 1970	2020, 2019, 2011, 1968, 2001, 2007, 2008, 1993, 2009, 2013, 2012, 1994, 1983, 2004, 2000
Лом (Бърза) – с. Горни Лом	2014, 2005, 1966, 1957, 1970, 2018, 1963, 1955, 1960, 1976, 1979, 1975, 1964, 2010, 1978, 1956, 1980	1993, 2011, 1985, 1990, 1992, 2019, 1968, 1961, 1988, 1989, 1991, 2020, 2007, 2009, 1984, 2008, 2000
Лом – с. Горни Лом	1954, 2014, 1955, 1960, 1956, 1953, 1962, 1957, 1966, 2010, 1963, 1970, 1961, 1975, 1980, 2015, 2018, 1979, 1964	1993, 1994, 2001, 1984, 2011, 1990, 1998, 1985, 2003, 1988, 2000, 1992, 1968, 2007, 2004, 1989, 1995, 2012, 1949
Лом – с. Василковци	2014, 1966, 1970, 2016, 1976, 2006, 2015, 1975, 2018, 1980, 1963, 2005, 1973, 1978, 2010	1993, 1968, 1989, 1985, 2011, 2020, 1994, 2019, 2001, 1990, 2013, 1988, 1991, 2007, 2002
Цибрица – с. Игнатово	1954, 1955, 1957, 1980, 2005, 1963, 1982, 1977, 1981, 1969, 2006, 1970, 1983, 1986	2001, 2002, 1997, 2004, 1952, 2003, 2000, 1993, 1968, 1964, 1992, 1998, 1953, 1951

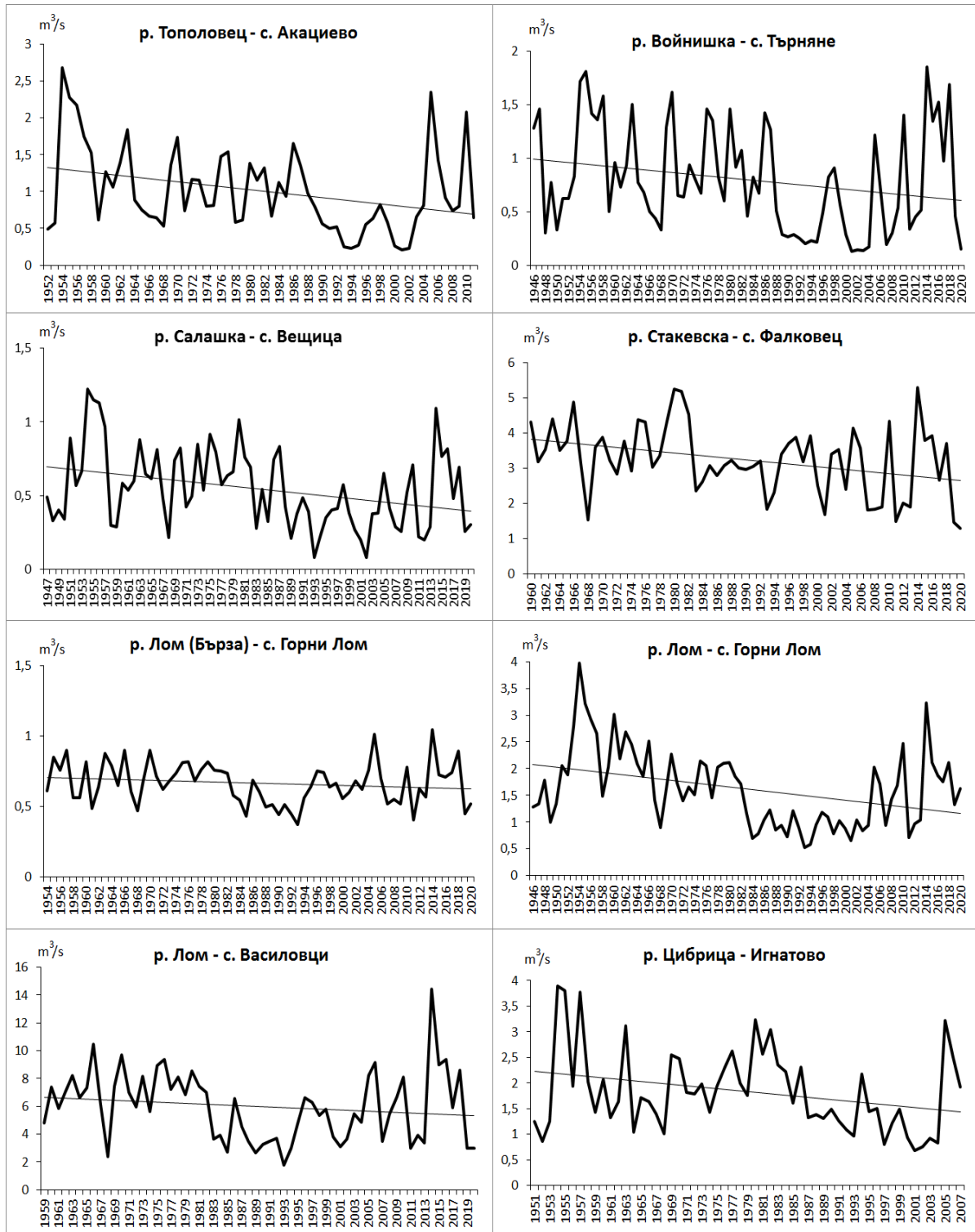


Фигура 6 Годишен речен отток с различна обезпеченост във водосборите западно от р. Огоста
Figure 6 Annual streamflow with a certain probability in the catchments west of the Ogosta River

Проверката за тенденции в многогодишната отточна динамика чрез прилагането на линеен тренд показва намаляване на годишния отток във всички изследвани речни водосбори (фиг. 7), което потвърждава анализите и резултатите на Димитров (2018) за периода 1961–2010 г.

Годишните водни количества се понижават с нееднаква интензивност в отделните части на територията. Негативният тренд е отчетливо изразен в равнинно-хълмистите водосбори (наклонът на регресионната линия е между -0.004 за р. Салашка – с. Вещица

и -0.021 за р. Лом – с. Василовци) и по-слабо подчертан в планинските поречия (-0.001 за р. Бърза – с. Горни Лом), което най-вероятно е отражение на по-малката устойчивост на снежната покривка в районите с по-ниска надморска височина.



Фигура 7 Линеен тренд на годишния речен отток във водосборите западно от р. Огоста
 Figure 7 Linear trend of annual streamflow in the catchments west of the Ogosta River

Чрез Mann-Kendall Test се установява, че наклонът на изравнителната линия е статистически значим за повечето водосбори и без статистическа значимост единствено за речните басейни на р. Лом (Бърза) – с. Горни Лом и р. Лом – с. Василковци (табл. 6).

Таблица 6
Table 6

Резултати от тренд анализа на годишния речен отток по Mann Kendall test
Results of the trend analysis of annual streamflow according to Mann Kendall test

Река – ХМС	p-value	Kendall's tau	Sen's slope
Тополовец – с. Акациево	0.007	-0.239	-0.012
Войнишка – с. Търняне	0.009	-0.205	-0.007
Салашка – с. Вещица	0.004	-0.231	-0.004
Стакевска – с. Фалковец	0.015	-0.213	-0.018
Лом (Бърза) – с. Горни Лом	0.099	-0.138	-0.001
Лом – с. Горни Лом	0.001	-0.257	-0.013
Лом – с. Василковци	0.074	-0.156	-0.021
Цибрица – с. Игнатово	0.024	-0.207	-0.014

Bold – статистически значим тренд

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Годишният речен отток във водосборите западно от р. Огоста намалява статистически значимо през последните десетилетия при непрекъснато увеличаване на колебанията около средномногогодишната стойност вследствие включването във времеви редове на екстремни членове с много рядка повторемост. Многогодишната отточна динамика не удостоверява наличие на изразена цикличност и се описва от синхронно редуващи се серии с многоводни, средноводни и многоводни години в съответствие с дългосрочните отточни вариации за територията на цялата страна.

Настоящата работа дава сведения за колебанията и тенденциите на речния отток в условията на изменения на климата. Получените резултати допълват информацията от минали проучвания с нови знания за съвременен период и обогатяват регионалната изученост на хидроложките процеси в България.

ANNUAL FLOW DYNAMICS IN THE CATCHMENTS WEST OF THE OGOSTA RIVER

SUMMARY

The assessment of long-term runoff variability is one of the most challenging scientific tasks for hydrology in the face of global warming. In this paper, annual flow dynamics, variability, and trends are analyzed at eight hydrometric stations. The studied region includes seven catchments located west of the Ogosta River in Northwestern Bulgaria. The observation period covers between 57 and 75 years

from 1946 until 2020. Descriptive statistical characteristics: minima, maxima and means, standard deviation, and coefficient of variation (C_v), as well as double mass curves and non-parametric criteria to check homogeneity and randomness of the annual time-series data, were applied in the first phase of the work. The oscillation and trend of the streamflow were estimated using different methods: moving average values, integral difference curves, flow duration curves, and linear trends. Preliminary testing based on double mass curves and non-parametric criteria shows that most of the time-series data are not homogeneous and do not follow a normal distribution. The log-normal theoretical distribution, which approximates the empirical data, was accepted. The obtained results give the following information: the mean annual runoff decreases after 1985, while the values of C_v increase. The methods of moving average values, integral difference curves, and runoff duration curves reveal an alternation of dry and wet years without clearly pronounced cyclicity. The tendency analysis shows a statistically significant negative trend in annual flow volumes. The present work complements previous studies and provides new data about the long-term runoff variability in Bulgaria.

ЛИТЕРАТУРА

- Ангелов, П. 2021. Иновативни методи за хидрометричен мониторинг. – *Автореферат на дисертация*, 37 с.
- Герасимов, С., Е. Божилова. 2003. Количествени измерения на водните ресурси в периода на засушаване. Природни, икономически и социални аспекти на засушаването в България 1982–1994 г. – В: *Засушаването в България – съвременен аналог на климатични промени*. С., Изд. на БАН, 72–81.
- Герасимов, С., М. Генев, Е. Божилова, Т. Орехова. 2004. Водните ресурси през периода на засушаване 1982–1994 г. – вероятни сценарии за бъдещо развитие. Херон прес, 79 с.
- Димитров, Й. 2018. Управление на речните водни ресурси в Северозападна България в условията на засушаване. – *Автореферат на дисертация*, 61 с.
- Кирилова, С. 2019. Хомогенност на хидроложките редове в контекста на хидротехническото планиране и проектиране. – *Сб. доклади от Първа научна конференция „Климат, атмосфера и водни ресурси в условията на климатични промени“*, 14–15 октомври 2019 г., София, България, 39–47.
- Кирилова, С. 2022. Месечен и сезонен отток на река Доспатска в условията на изменения на климата и антропогенни въздействия. – *Годишник на Университета по архитектура, строителство и геодезия (УАСГ)*, 55, 155–167.
- Климатичен справочник на НР България, 1990. – ГУХМ, БАН.
- Лазаров, К., Л. Зяпков, Д. Златунова. 2004. Териториални характеристики на екстремните многоводни и маловодни години при годишните колебания на речните води в България. – *Годишник на СУ, ГГФ*, книга 2 – География, 97, 45–59.
- Мандаджиев, Д. 1989. Годишен отток. – В: *Природният и икономическият потенциал на планините в България*, Изд. на БАН, 191–203.
- Николова, Н., Н. Асенова, В. Даскалова, Г. Христов, Н. Дякова. 2016. Многогодишни изменения на температурата на въздуха по българското крайбрежие на река Дунав. – *Годишник на СУ, ГГФ*, книга 2, 108, 71–83.
- План за управление на резерват „Чупрене“, 2014. www.chuprene.com/ (посетен: 19.10.2023 г.).
- План за управление на речните басейни (ПУРБ), 2016–2021. Басейнова дирекция Дунавски район. www.bd-dunav.bg/ (посетен: 26.03.2022 г.).
- Пенчев, П. К. Стойчев, М. Калинова. 1971. Относно водоносността на маловодните и многоводните години при цикличните колебания на речния отток в България. – *Годишник на СУ, ГГФ*, книга 2, 65, 47–61.
- Петкова, Н. 2014. Климатични колебания и изменение на снежната покривка в България. – *Автореферат на дисертация*, 47 с.
- Хидрологичен наръчник, 1980. – ГУХМ, БАН.
- Хидрологичен справочник на реките в България, т. 2, 1981. – ГУХМ, БАН.
- Хидрологични годишници, 1976–1983. – ГУХМ, БАН.

- Христова, Н. 2003. Класификация на реките в България по дължина и водосборна площ. – *Годишник на СУ, ГГФ*, книга 2 – География, 93, 167–196.
- Христова, Н. 2010. Методи за изследване на речния отток. Тип топ прес, 198 с.
- Христова, Н. 2012. Речни води на България. Тип топ прес, 832 с.
- Христова, Н., Е. Иванова. 2017. Оценка и географско разпределение на речния отток през 2000/2001 година. – *Годишник на СУ, ГГФ*, книга 2 – География, 110, 39–51.
- Христова, Н. Ив. Пенков, К. Сейменов. 2018. Колебания и климатична еластичност на годишния речен отток в България. – *Годишник на СУ, ГГФ*, книга 2 – География, 111, 63–73.
- Христова, Н., Т. Орехова, О. Ничева. 2020. Месечен и сезонен отток във високопланински водосбори в Пирин планина. – *Сб. доклади от научна конференция „Климат, атмосфера и водни ресурси в условията на климатични промени“*, 15–16 октомври 2020 г., София, България, 206–213.
- Arslan, G., S. Kale, A. Y. Sönmez. 2020. Trend analysis and forecasting of the Gökırmak River streamflow (Turkey). – *Oceanological and Hydrobiological Studies*, 49(3), 230–246.
- Artinyan, E., P. Tsarev, K. Kroumova. 2021. Variations of the yearly runoff in Bulgaria up to the end of 21st century at the basis of three climatic scenarios. – *Bulgarian Journal of Meteorology and Hydrology*, 25(1).
- Banasik, K., L. Hejduk. 2012. Long-term changes in runoff from a small agricultural catchment. – *Soil and Water Resources*, 7(2), 64–72.
- Hristova, N., E. Ivanova, K. Seymenov. 2017. Geographical aspects of floods in Northwest Bulgaria. – *International Knowledge Journal*, 16(2), 907–914.
- Lizama-Rivas, B., I. Koleva-Lizama. 2005. Influence of climate variability on water resources in the Bulgarian South Black Sea basin. – *Regional Hydrological Impacts of Climate Change*, IAHS, 81–88.
- Manea, A., N. Nikolova, C. Boroneant, A. Orzan. 2010. Changes in annual cycle and seasonal characteristics of precipitation in the Danube River lower basin. – *Romanian Journal of Meteorology*, 10(2), 1–10.
- Mann-Kendal, M. G. 1975. Non-parametric tests against trend. – *Econometrica*, 13, 163–171.
- Shengzhi, H., H. Qiang, C. Yutong. 2015. Quantitative estimation on contribution of climate changes and human activities to decreasing runoff in Weihe River basin. – *Chinese Geographical Science*, 25(5), 569–581.
- Umar, D. A., M. F. Ramli, A. Z. Aris, N. R. Jamil, J. H. Abdulkareem. 2018. Runoff irregularities, trends, and variations in tropical semi-arid river catchment. – *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 19, 335–348.
- Xu, J., X. Gao, Z. Yang, T. Xu. 2022. Trend and attribution analysis of runoff changes in the Weihe River basin in the last 50 years. – *Water*, 14(47), 1–12.
- Zhong, D., Z. Dong, G. Fu, J. Bian, F. Kong, W. Wang, Y. Zhao. 2021. Trend and change points of streamflow in the Yellow River and their attributions. – *Journal of Water and Climate Change*, 12(1), 136–151.