

Jakub WOJKOWSKI<sup>1</sup>, Andrzej WAŁĘGA<sup>1</sup>, Dariusz MŁYŃSKI<sup>1</sup>,  
Artur RADECKI-PAWLIK<sup>2</sup>, Tomáš LEPEŠKA<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Uniwersytet Rolniczy im. Hugona Kołłątaja w Krakowie

<sup>2</sup>Politechnika Krakowska

<sup>3</sup>Politechnika w Zvoleniu

**WPŁYW ZMIAN POKRYCIA  
I UŻYTKOWANIA TERENU NA KRAJOBRAZOWY  
POTENCJAŁ HYDRYCZNY ZLEWNI I TRENDY  
PRZEPŁYWÓW CHARAKTERYSTYCZNYCH**

**INFLUENCE OF LAND USE AND LAND COVER  
ON LANDSCAPE HYDRIC POTENTIAL  
AND TRENDS OF FLOWS**

**Abstract**

The aim of the study was to analyze the relationship between *LHP* changes and river flow trends in catchments. The analyzes were carried out in catchments located in the Upper Vistula Basin. The studies included: an analysis of land cover changes based on Corine Land Cover in the period 1990-2018; changes in *LHP* values in the analysed period; analysis trend of minimum *NQ*, average *SQ*, and maximum annual *WQ* flows using the Mann-Kendal test for 33 rivers in the Upper Vistula Basin. There was a positive tendency in increasing afforested areas in the context of *LHP* value, as well as a negative tendency in increasing build-up areas. In the analysed period, *LHP* was decreased in 21 catchments and increased in 12 catchments. In general, *LHP* decreased in the catchments located on the left side of the Vistula basin, where agriculture, developing industry and urban areas are observed. The relationship between changes in *LHP* and the direction of trends in main flows was detected. Decreasing *LHP* shows that catchments are losing their retention capacity. The greatest changes in the flow trend were observed mainly in the catchments located in the Upper Dunajec and the Upper Raba Basins.

**Key words:** main flows, water storage, *LULC*, *LUCC*, Mann-Kendall test

## 1. WSTĘP

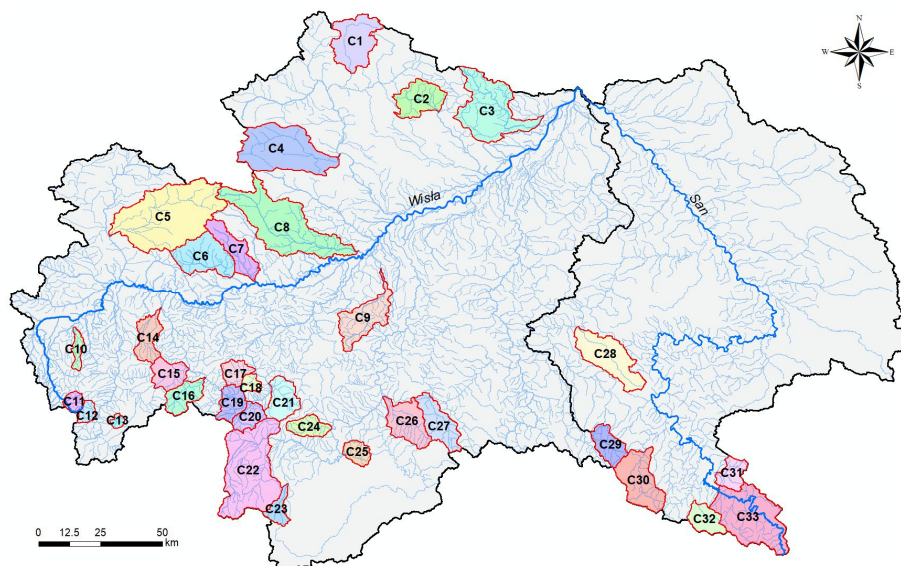
Pokrycie i użytkowanie terenów *Land Use and Land Cover (LULC)* jest determinowane przez wiele czynników takich jak klimat, geologia, czy funkcjonowanie organizmów. Obecnie działalność człowieka jest głównym czynnikiem wpływającym na zmiany pokrycia i użytkowania obszarów. W ujęciu globalnym *LUCC* są dominującym czynnikiem wpływającym na stan ekosystemów i krajobrazu (DeFries i in. 2004, Wang i in. 2021) oraz reżim hydrologiczny (Viola i in. 2014). Szczególnie widoczne są zmiany sposobu użytkowania terenów w zlewniach zurbanizowanych. W efekcie tych zmian, straty opadu na infiltrację ulegają zmniejszeniu i w konsekwencji do cieków odpływa zwiększona objętość wody, zwiększając tym samym zagrożenie podtopieniami czy powodzią błyskawicznymi. Z kolei przekształcenie użytków leśnych w rolne wpływa negatywnie na strukturę gleby i jej wartości odżywcze. Wynikiem tego są zmiany w intercepcji, infiltracji, ewapotranspiracji i zasilania wód gruntowych (Kibbi i in. 2021). Użytkowanie i pokrycie wpływa także na wielkość ładunków biogenów odpływających ze zlewni (Bogdał i in. 2019; Muwamba i in. 2020).

Krajobrazowy Potencjał Hydryczny (*Landscape Hydric Potential – LHP*) zlewni (Lepeška 2013) jest parametrem wrażliwym na zmiany związanym z wielkością retencji wodnej w zlewni. Wskaźnik ten określa zdolność obszaru do spowalniania i zatrzymywania odpływu oraz do infiltracji opadów do gruntu. Przyjmuje on wartości bezwymiarowe w zakresie od -10,1 (ekstremalnie złe warunki do retencji) do 20,1 (doskonałe warunki do retencji). Wraz ze wzrostem antroporesji wartości tego wskaźnika ulegają obniżeniu. Jest to stosunkowo nowa metoda stanowiąca narzędzie do wspomagania zarządzania zasobami wodnymi. Obliczenia *LHP* opierają się na integracji danych przestrzennych w środowisku *GIS* (Lepeška 2010). Koncepcja *LHP* została zweryfikowana w kilku zlewniach na terenie Słowacji (Lepeška 2013, Majlingová i in. 2012, Petrovič i in. 2017, Šatalová 2016, Šatalová i Kenderessy 2017, Stranovský 2013). Metoda *LHP* była również stosowana w Polsce (Lepeška i in. 2017). Wojkowski i inni (2019) wykazali, że sezonowość maksymalnych rocznych przepływów w zlewniach położonych w Karpatach Zachodnich można wyjaśnić zmianami *LHP*. Wałęga i in. (2020) wykorzystali *LHP* jako jeden z parametrów w równaniu empirycznym do obliczania mediany rocznego maksymalnego przepływu w zlewniach dorzecza górnej Wisły. Do tej pory jednak nie prowadzono badań wpływu *LUCC* na wartości *LHP* oraz w konsekwencji wpływu tych zmian na trendy przepływów charakterystycznych. Celem pracy było zbadanie związku między zmianami *LHP* a trendami przepływów rzek w zlewniach. W oparciu o problem główny określono następujące cele szczegółowe: (1) analiza *LUCC* w zlewniach położonych w dorzeczu górnej Wisły w latach 1990–2018, (2) analiza zmian wartości *LHP* w odniesieniu do *LUCC* oraz (3) powiązanie *LULC* i zmian *LHP* z trendami przepływów charakterystycznych.

## 2. METODYKA BADAŃ

### 2.1. Obszar badań

Analizy wpływu zmian użytkowania zlewni na wartości *LHP* i trendy przepływów charakterystycznych wykonano dla 33 zlewni zlokalizowanych w dorzeczu górnej Wisły (rys. 1). Podstawowe charakterystyki fizjograficzne zlewni podano w tabelicy 1.



Rys. 1. Lokalizacja badanych zlewni na tle dorzecza górnej Wisły  
 Fig.1. Location of the analysed catchments in the Upper Vistula Basin

Tablica 1

Wartości wybranych parametrów fizjograficznych badanych zlewni

Table 1

Values of selected physiographic characteristics of the research basin located in the Upper Vistula Basin

Kod zlewni	Rzeka - wodowskaz	<i>A</i>	<i>L</i>	$\Psi$	<i>I</i>	<i>D</i>	<i>N<sub>i</sub></i>
		[km <sup>2</sup> ]	[km]	[‰]	[‰]	[km·km <sup>-2</sup> ]	[%]
C1	Bobrza - Słowik	311.6	40.2	46.1	3.6	1.1	52
C2	Czarna - Raków	221.2	22.1	15.6	1.9	0.9	46
C3	Koprzywianka - Koprzywnica	518.6	70.3	13.4	3.5	1.1	64
C4	Mierzawa - Michałów	555.6	64.7	7.8	1.7	0.6	55
C5	Biała Przemsza - Niwka	865.0	70.4	8.9	1.5	0.9	39
C6	Rudawa - Balice	294.1	30.0	16.4	6.0	1.2	62
C7	Prądnik - Kraków	193.1	35.9	93.6	5.8	0.4	40
C8	Szreniawa - Biskupice	702.9	91.4	10.8	2.2	0.8	66
C9	Uszwica - Borzęcin	268.5	55.3	20.9	6.0	1.8	79
C10	Wapienica - Podkępie	52.7	18.5	110.2	34.6	1.8	83
C11	Wisła-Wisła	53.4	12.1	101.0	54.0	2.0	78
C12	Bystra - Kamesznica	49.2	10.3	103.2	47.9	2.1	84
C13	Żabniczanka - Żabnica	23.4	4.6	156.1	123.1	2.0	72
C14	Wieprzówka - Rudze	151.8	29.4	54.0	22.3	2.1	78
C15	Stryszawka - Sucha	140.5	15.8	50.0	33.0	2.6	78
C16	Skawica - Skawica Dolna	143.8	19.5	103.6	27.4	2.6	79
C17	Krzczonówka - Krzczonów	92.9	17.8	53.5	18.0	1.9	75
C18	Lubieńka - Lubień	48.1	4.7	74.1	31.3	2.2	80
C19	Skawa - Jordanów	123.7	36.8	37.2	7.5	2.4	77
C20	Raba - Rabka	102.1	12.0	43.0	9.0	2.6	71
C21	Mszanka - Mszana Dolna	174.0	18.7	64.2	18.4	2.3	81
C22	Dunajec - Nowy Targ	685.1	50.5	62.1	17.6	2.1	82
C23	Białka - Łysa Polana	78.0	19.9	158.9	67.5	1.3	48

C24	Ochotnica - Tylmanowa	109.0	22.8	84.5	37.9	2.1	79
C25	Grajcarek - Szczawnica	84.1	15.6	84.0	32.9	2.2	78
C26	Kamienica - Nowy Sącz	237.7	34.5	54.6	17.1	1.9	82
C27	Biała - Grybów	212.2	31.7	38.8	14.2	1.8	85
C28	Stobnica - Godowa	335.8	47.8	17.1	3.8	2.2	79
C29	Wisłok - Puławy	143.6	27.8	40.0	16.6	1.8	87
C30	Ośława - Szczawne	307.0	38.9	34.2	10.3	2.3	86
C31	Czarny - Polana	113.8	21.9	44.3	15.9	1.7	87
C32	Wetlina - Kalnica	131.2	17.7	62.2	27.4	2.2	89
C33	San - Zatwarnica	535.4	83.8	35.4	5.3	1.9	67

$A$  - powierzchnia zlewni,  $L$  - długość głównego ciek,  $\Psi$  - średni spadek zlewni,  $I$  - spadek rzeki,  $D$  - gęstość sieci rzecznej,  $N_i$  - wskaźnik nieprzepuszczalności gleby

## 2.2. Wyznaczenie wartości $LHP$

Metodologia wyznaczania  $LHP$  została szczegółowo opisana przez Lepeškę (2010), Lepeškę i in. (2017), Wałęgę i in. (2020) oraz Wojkowskiego i in. (2019). Na potrzeby analiz do obliczeń  $LHP$  wykorzystano następujące atrybuty środowiskowe:

- charakterystykę hydrogeologiczną ( $H$ ) określoną w oparciu o przewodność podłoża na podstawie Mapy Hydrogeologicznej Polski ( $MHP$ ) w skali 1:50000,
- typy gleb ( $St$ ) i teksturę gleb ( $Ss$ ), które oszacowano na podstawie mapy glebowo-rolniczej w skali 1:5000,
- klimatyczny bilans wodny ( $KBW$ ), w którym ewapotranspirację potencjalną ( $ETP$ ) oszacowano na podstawie wzoru Turca (Turc, 1961) oraz danych meteorologicznych (opady, temperatura) z lat 1990-2018; dane te pozyskano z Instytutu Meteorologii i Gospodarki Wodnej – PIB,
- nachylenie terenu ( $Si$ ) bazuje na numerycznym modelu terenu ( $DEM$ ) o rozdzielczości 25 m,
- pokrycie i użytkowanie terenu (z wyłączeniem lasów) ( $N$ ), które zidentyfikowano za pomocą danych zawartych w bazie  $CORINE$  Land Cover w latach 1990, 2000, 2006, 2012 i 2018,
- kondycja lasów ( $F$ ), która została oceniona na podstawie raportów o stanie lasów Polski w latach 1990, 2000, 2006, 2012 i 2018.

Rozkład przestrzenny  $LHP$  jest wynikiem algebry map jako sumą wszystkich wyżej wymienionych wagowanych atrybutów środowiskowych i jest obliczana zgodnie z równaniem (1):

$$LHP = 1,5H + 2,5St + 3Ss + 4KBW + 3Si + 3,5F + 2N \quad (1)$$

gdzie:

- $H$  – atrybut charakterystyki hydrogeologicznej zlewni,
- $St$  – atrybut typu gleby,
- $Ss$  – atrybut tekstury gleby,
- $KBW$  – atrybut klimatycznego bilansu wodnego,
- $Si$  – atrybut nachylenia zboczy,
- $F$  – atrybut kondycji lasów,
- $N$  – atrybut związany z  $LULC$  (z wyłączeniem lasów).

Atrybuty środowiskowe zintegrowano w oprogramowaniu *GIS* i poddano analizom przestrzennym. Przetwarzanie danych i analizy przestrzenne wykonano za pomocą oprogramowania ArcGIS (wersja 10.4.1).

### 2.3. Zmiany pokrycia terenu

Przy ocenie *LUCC* stosuje się metody jakościowe i ilościowe. Obie metody mogą być wykorzystane do określenia zróżnicowania pokrycia terenu pomiędzy badanymi latami. Dane *CORINE Land Cover* przedstawiają najdłuższą jednorodną serię danych o pokryciu terenu ze spójnym systemem oznaczania klas. W pracy dane *CORINE Land Cover* wykorzystano do identyfikacji i analizy zmian *LULC* na badanym obszarze w latach 1990, 2000, 2006, 2012 i 2018. Obliczenia oraz analizy jakościowe i ilościowe *LUCC* wykonano w oprogramowaniu open source SAGA GIS (wersja 8.0.1). W tym celu wykorzystano zaimplementowane w SAGA GIS narzędzia „*Change Detection*” i „*Confusion Matrix*” (Conrad i in. 2015) do mapowania zidentyfikowanych zmian i przekształceń poszczególnych klas *LULC*.

### 2.4. Trendy przepływów charakterystycznych

Analiza trendu dotyczyła następujących charakterystyk przepływów: *NQ*, *SQ* i *WQ* dla wielolecia 1990-2018. Dane w postaci przepływów średnich dobowych, które były podstawą do obliczenia wymienionych charakterystyk przepływów pozyskano z Instytutu Meteorologii i Gospodarki Wodnej Państwowego Instytutu Badawczego ([www.danepubliczne.imgw.pl](http://www.danepubliczne.imgw.pl)) Analizę przeprowadzono za pomocą zmodyfikowanego testu Manna-Kendalla (*MK*). Hipoteza zerowa (*H0*) testu zakłada brak monotonicznego trendu danych, podczas gdy hipoteza alternatywna (*HA*) stwierdza, że taki trend istnieje. Obliczenia przeprowadzono na poziomie istotności  $\alpha = 0,05$ . Statystyka testu Manna-Kendalla jest obliczana z równań (Młyński i in. 2019):

$$S = \sum_{k=1}^{n-1} \sum_{j=k+1}^n \text{sgn}(x_j - x_k) \quad (2)$$

$$\text{sgn}(x_j - x_k) = \begin{cases} 1 \text{ for } (x_j - x_k) > 0 \\ 0 \text{ for } (x_j - x_k) = 0 \\ -1 \text{ for } (x_j - x_k) < 0 \end{cases} \quad (3)$$

gdzie:

$n$  – liczba elementów w serii czasowej.

Znormalizowana statystyka  $Z$  została obliczona wg równania (4):

$$Z = \frac{S - \text{sgn}(S)}{\text{Var}(S)^{1/2}} \quad (4)$$

gdzie:

$\text{Var}(S)$  – wariancja obliczana równaniem (5):

$$\text{Var}(S) = \frac{1}{18} \cdot (n \cdot (n - 1) \cdot (2 \cdot n + 5)) \quad (5)$$

Głównym założeniem testu MK jest brak autokorelacji poszczególnych elementów szeregu czasowego. W przypadku analizy przepływów autokorelacja jest możliwa, co z kolei prowadzi do niedoszacowania  $\text{Var}(S)$ . W związku z tym uwzględniono poprawkę wariancji, obliczoną tylko dla elementów serii czasowej o istotnej częściowej autokorelacji za pomocą równania:

$$\text{Var}(S)^* = \text{Var}(S) \cdot \frac{n}{n_s^*} \quad (6)$$

gdzie:

$\frac{n}{n_s^*}$  – efektywna liczba obserwacji obliczana ze wzoru:

$$\frac{n}{n_s^*} = 1 + \frac{2}{n(n-1)(n-2)} \cdot \sum_{k=1}^{n-1} (n-k)(n-k-1)(n-k-2)\rho_k \quad (7)$$

gdzie:

$k$  – wartość poprawki,

$\rho_k$  – wartość kolejnego istotnego współczynnika autokorelacji.

### 3. WYNIKI I DISKUSJA

#### 3.1. Zmiany w pokryciu i użytkowaniu zlewni

Na analizowanym obszarze dominującym typem użytkowania są użytki rolne, zajmujące 47% powierzchni wszystkich badanych zlewni. Drugim typem użytkowania są lasy, które stanowią 44%. Obszary z zabudową rozproszoną i zwartą stanowią prawie 8%, a tereny podmokłe i obszary pod wodą zajmują tylko 1% całkowitej powierzchni badanych zlewni (tablica 2). Największe zmiany w użytkowaniu zlewni dotyczą przekształceń na obszary zabudowane (111-142). W badanym okresie 1990-2018 te klasy pokrycia terenu powiększyły się o 32544 ha (4,03%). Pomimo, że wspomniane zmiany zachodzą nieregularnie w badanych zlewniach to jednak obserwowany trend może wpływać negatywnie na stosunki wodne w tym obszarze.

W tablicy 2 przedstawiono *LUCC* obserwowane w latach 1990-2018 w badanych zlewniach. Zaobserwowano cztery wzorce zmian: 1) brak zmian *LULC*, 2) monotoniczny trend rosnący danej klasy *LULC*, 3) monotoniczny trend malejący danej klasy *LULC* oraz 4) skokowe zmiany *LULC*. W pierwszym przypadku brak było istotnych zmian *LULC* – sytuacja obserwowana dla lotnisk (124) i rzek (511). Ponadto nastąpiły niewielkie zmiany powierzchni zabudowy zwartej miejskiej (111). W przypadku drugiego wzorca nastąpił w latach 1990-2018 wzrost w przypadku 10 klas *LULC*. Należały do nich: zabudowa miejska rozproszona (112), tereny przemysłowe lub handlowe (121), obiekty sportowe i rekreacyjne (142), drzewa owocowe i plantacje krzewów (222), las liściasty (311), las mieszany (313), przejściowy obszar leśny (324), zbiorniki wodne (512), torfowiska (412) oraz plaże, wydmy, piaski (331). Generalnie, zwiększenie udziału obszarów leśnych jest pozytywną tendencją w kontekście wartości *LHP*, podczas gdy wzrost obszarów

miejskich i przemysłowych wpływa na obniżenie *LHP*. Można dostrzec pozytywną tendencję do powiększania się zbiorowisk leśnych, które mają kluczowe znaczenie dla poprawy *LHP*. Zwiększenie lesistości zlewni wpływa na zmniejszenie odpływu (Viola i in. 2014) ze zlewni. Z drugiej strony wzrost udziału obszarów miejskich z rozproszoną zabudową może wpływać na zmniejszenie wielkości infiltracji i w konsekwencji na mniejszą wielkość retencji wodnej (Lepeška i in. 2020).

Tablica 2  
Procentowy udział klas użytkowania terenu wg CORINE Land Cover classes w badanych zlewniach dorzecza górnej Wisły w okresie 1990–2018

Table 2  
The area (in %) of the CORINE Land Cover classes in the Upper Vistula Basin in the period 1990-2018

Klasy użytkowania CORINE Land Cover		Kod użytku	Lata				
			1990	2000	2006	2012	2018
1	Ciągła zabudowa miejska	111	0.02	0.03	0.03	0.03	0.03
2	Nieciągła zabudowa miejska fabric	112	3.17	4.13	5.89	6.53	6.54
3	Tereny przemysłowe lub handlowe	121	0.45	0.46	0.49	0.51	0.53
4	Drogi i koleje	122	0.15	0.13	0.14	0.14	0.18
5	Lotniska	124	0.004	0.004	0.004	0.004	0.004
6	Wyrobiska kopalniane	131	0.40	0.37	0.25	0.45	0.43
7	Składowiska odpadów	132	0.06	0.06	0.05	0.01	0.01
8	Place budowy	133	0.01	0.00	0.00	0.01	0.04
9	Miejskie obszary zieleni	141	0.05	0.04	0.04	0.05	0.05
10	Obszary sportowe i rekreacyjne	142	0.07	0.07	0.08	0.13	0.14
11	Tereny rolnicze nienawadniane	211	30.50	30.60	31.67	28.05	27.97
12	Drzewa owocowe	222	0.05	0.15	0.18	0.21	0.20
13	Patwiska	231	7.35	8.10	6.50	9.23	9.22
14	Grunty orne	242	9.11	7.39	4.97	4.75	4.75
15	Tereny rolnicze	243	5.64	4.90	4.46	4.55	4.53
16	Las liściasty	311	9.25	9.41	9.57	9.91	9.94
17	Las iglasty	312	17.82	17.88	18.33	18.04	17.79
18	Las mieszany	313	12.16	12.65	13.11	13.25	13.34
19	Łąki	321	1.48	0.96	0.87	0.81	0.81
20	wrzosowiska	322	0.42	0.43	0.44	0.39	0.39
21	Przejściowy obszar leśny	324	0.94	1.45	2.12	2.17	2.31
22	Wyspy, odsypiska, plaże	331	0.00	0.00	0.00	0.00	0.09
23	Skały	332	0.42	0.36	0.37	0.32	0.32
24	Obszary słabo porośnięte	333	0.23	0.18	0.18	0.21	0.12
26	Bagna	411	0.05	0.03	0.03	0.02	0.02
27	Torfowiska		0.07	0.07	0.07	0.08	0.08
28	Rzeki	511	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03
29	Zbiorniki wodne	512	0.09	0.10	0.12	0.12	0.12

Zmniejszanie się udziału klas *LULC* w latach 1990–2018 występuje dla: 132 – składowisk odpadów, 211 – gruntów ornych niebędących pod wpływem urządzeń nawadniających, 242 – złożonych systemów upraw, 243 – terenów rolniczych z naturalną roślinnością, 321 – łąk, 332 – skał, 333 – obszarów słabo porośniętych roślinnością i 411 – bagien. Najważniejsze zmiany dotyczyły klasy 211 (spadek

z 30,5% w 1990 do 27,97% w 2018), 242 (spadek z 9,11% w 1990 r. do 4,75% w 2018 r.) oraz 243 (spadek z 5,64% w 1990 r. do 4,53 % w 2018 r.). Ostatni wzorzec zmian klas *LULC* charakteryzuje się skokowymi zmianami. Jest to obserwowane w przypadku następujących klas: 131 – miejsca wydobycia kopalin, 122 – sieci drogowe i kolejowe oraz tereny towarzyszące, 133 – place budowy, 141 – zielone tereny miejskie, 231 – pastwiska, 312 – las iglasty , i 322 – wrzosowiska. W największym stopniu zmiany zachodzą w przypadku pastwisk 231 (udział 7,35% w 1990 r. i 9,22% w 2018 r.) oraz lasów iglastych 312 (udział 17,82% w 1990 r. i 17,79% w 2018 r.). Największy wzrost udziału klas *LULC* jest obserwowany w przypadku 211 – gruntów ornych niebędących pod wpływem urządzeń nawadniających i 112 – rozproszonej zabudowy miejskiej.

### 3.2. Zmiany wartości *LHP* w badanym okresie

W tabelicy 3 przedstawiono zmiany średnich wartości *LHP* w analizowanych zlewniach. Wielkości *LHP* w 2018 roku wahały się od 5,85 dla Skawy do 20,15 dla Wisły. Zlewnie o niskich wartościach *LHP* mają ograniczoną zdolność do zatrzymywania wody, co spowodowane jest niewielką przepuszczalnością gleby, większymi nachyleniami zboczy i zwiększonym udziałem powierzchni uszczelnionych. W latach 1990–2018 wartości *LHP* zmniejszyły się w 21 zlewniach, a wzrosły w 12. Największy spadek wartości *LHP* zaobserwowano w zlewni Wapienicy (22,3%) oraz w zlewni Skawy (15,3%). W obu zlewniach zmniejszenie *LHP* nastąpiło z powodu przekształceń użytkowania zlewni z typowego dla obszarów o większych zdolnościach retencyjnych na tereny bardziej uszczelnione jak obszary o zabudowie zwartej lub przemysłowe i handlowe. W pozostałych zlewniach, w których zaobserwowano spadek wartości *LHP*, zmiany były niewielkie i nie wpływały istotnie na zmiany zdolności retencyjnych zlewni. Ponadto w tabelicy 3 pokazano nieznaczny wzrost *LHP* w kilku zlewniach. Wszystkie zmiany spowodowane były przekształceniem obszarów zabudowanych na użytkowanie bardziej sprzyjające infiltracji wody, jak obszary rolnicze, leśne i półnaturalne. Na nieznaczny wzrost wartości *LHP* wpłynęło również położenie analizowanych zlewni, zwłaszcza zlewni zlokalizowanych w prawobrzeżnym dorzeczu Wisły, gdzie dominujące środowiska naturalne (np. lasy) znajdują się w obrębie parków narodowych i innych obszarów prawnie chronionych. Generalnie *LHP* zmniejszył się w zlewniach położonych w lewobrzeżnym dorzeczu Wisły, gdzie występują korzystniejsze warunki dla rolnictwa, rozwijającego się przemysłu i obszarów miejskich. Negatywny wpływ na *LHP* jest obserwowany na prawie 620 km<sup>2</sup> gruntów (7,7% całkowitej powierzchni analizowanych zlewni) i był powiązany z wylesieniem, wzrostem zabudowy i przekształceniem naturalnych użytków zielonych lub pastwisk na grunty orne. Wzrost wartości *LHP* wystąpił na 783,5 km<sup>2</sup> powierzchni (9,7% powierzchni badanych zlewni). Zmiany te powiązano z zalesianiem.



Tablica 3

Zmiany wartości *LHP* w zlewniach dorzecza górnej Wisły w latach 1990–2018

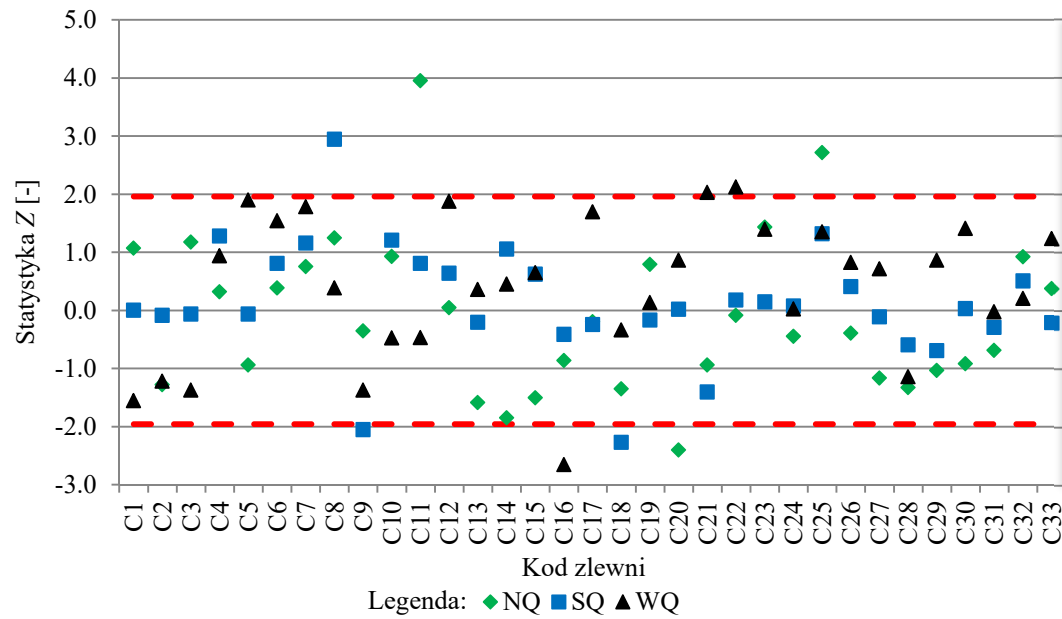
Table 3

Changes in landscape hydric potential (*LHP*) in the Upper Vistula Basin during the period 1990-2018

Kod zlewni	Rzeka - przekrój	Krajowy Potencjał Hydryczny ( <i>LHP</i> )					$\Delta$ <i>LHP</i> 1990- 2018
		1990	2000	2006	2012	2018	
C10	Wapienica - Podkępie	13.34	13.17	10.52	10.36	10.36	-2.98
C19	Skawa - Jordanów	6.91	6.72	5.83	5.88	5.85	-1.07
C17	Krzczonówka - Krzczonów	7.73	7.70	6.56	6.93	6.92	-0.81
C7	Prądnik - Ojców	7.37	7.20	6.77	6.61	6.59	-0.78
C6	Rudawa - Balice	6.93	6.56	6.34	6.21	6.20	-0.73
C22	Dunajec - Nowy Targ	10.33	10.30	8.54	9.56	9.69	-0.64
C14	Wieprzówka - Rudze	8.17	8.11	7.57	7.54	7.54	-0.62
C1	Bobrza - Słowik	11.40	10.96	10.93	10.79	10.79	-0.61
C8	Szreniawa - Biskupice	7.08	6.69	6.40	6.50	6.50	-0.58
C4	Mierzawa - Michałów	10.70	10.35	10.24	10.38	10.32	-0.38
C9	Uszwica - Borzęcin	6.48	6.32	6.09	6.13	6.11	-0.37
C28	Stobnica - Godowa	8.19	8.13	7.82	7.89	7.85	-0.34
C18	Lubieńka - Lubień	6.78	6.78	6.08	6.58	6.54	-0.25
C20	Raba - Rabka	8.02	7.95	6.94	7.84	7.85	-0.17
C33	San - Zatwarnica	13.50	13.42	13.30	13.34	13.35	-0.15
C3	Koprzywianka -	9.22	9.16	9.09	9.09	9.08	-0.14
C24	Ochotnica - Tylmanowa	8.45	8.12	8.21	8.34	8.34	-0.12
C21	Mszanka - Mszana Dolna	6.91	6.56	6.37	6.80	6.82	-0.10
C32	Wetlina - Kalnica	13.40	13.39	13.32	13.32	13.34	-0.06
C2	Czarna - Raków	13.53	13.53	13.59	13.49	13.47	-0.06
C5	Biała Przemsza - Niwka	9.70	9.80	10.08	9.75	9.68	-0.03
C16	Skawica - Skawica Dolna	8.77	8.75	8.34	8.82	8.82	0.05
C29	Wiśłok - Puławy	13.84	13.80	13.58	13.93	13.92	0.08
C30	Ośława - Szczawne	12.47	12.41	12.38	12.54	12.55	0.08
C15	Stryszawka - Sucha	8.11	8.12	7.58	8.24	8.24	0.13
C25	Grajcarek - Szczawnica	7.76	7.76	7.93	7.90	7.90	0.14
C26	Kamienica - Nowy Sącz	7.24	7.22	7.17	7.43	7.43	0.19
C27	Biała - Grybów	6.24	6.40	6.45	6.49	6.49	0.25
C31	Czarny - Polana	12.98	13.08	13.23	13.25	13.25	0.28
C23	Białka - Łysa Polana	10.71	10.62	10.85	11.24	11.11	0.40
C13	Żabniczanka - Żabnica	14.97	15.19	15.44	15.46	15.46	0.49
C11	Wisła - Wisła	19.50	19.61	19.73	20.36	20.15	0.65
C12	Bystra - Kamesznica	16.23	16.29	15.97	16.87	16.93	0.70

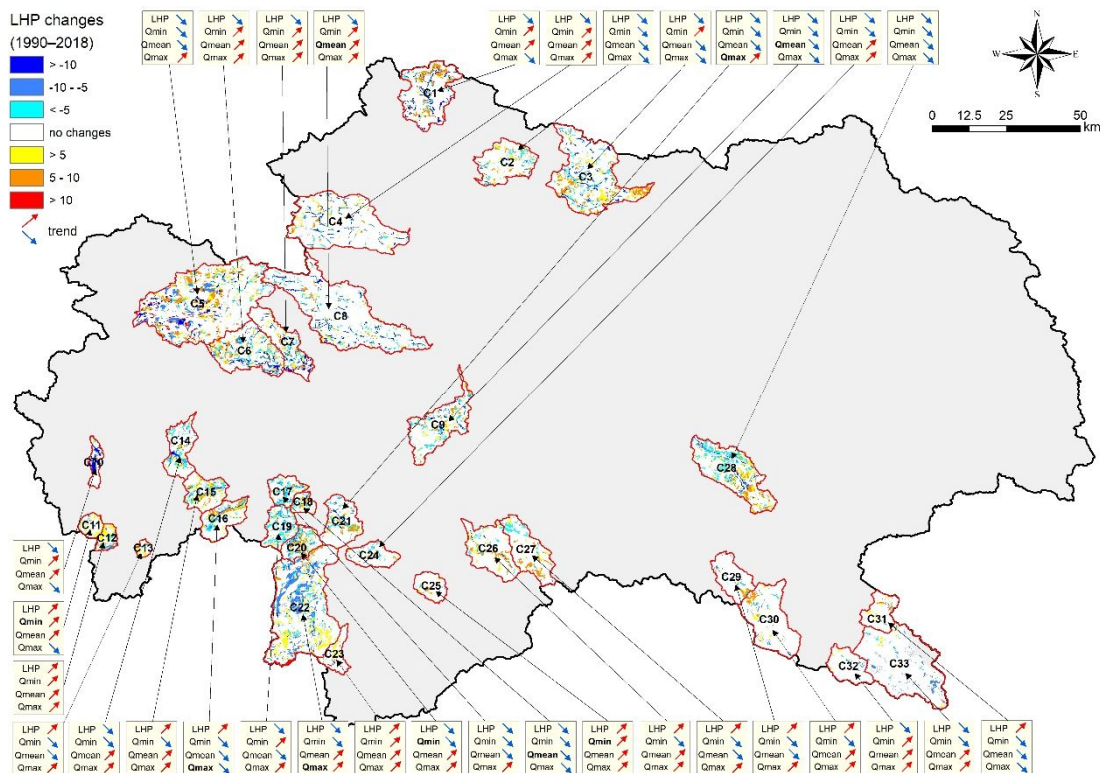
### 3.3. Związki między *LHP* a trendami przepływów

Wyniki analizy trendów przepływów charakterystycznych w okresie 1990-2018 w badanych zlewniach przedstawiono na rys. 2 i 3 w ujęciu przestrzennym na tle zaobserwowanych zmian *LHP*.



Rys. 2. Wartości statystyki Z testu MK w analizowanych zlewniach; linie przerywane oznaczają poziom akceptowalności hipotezy  $H_0$  o braku istotnego trendu monotonicznego

Fig. 2. Z-statistic for analysed catchments: dashed lines are the acceptability level of the  $H_0$  hypothesis



Rys. 3. Zmiany LHP oraz kierunki trendów przepływów w analizowanych zlewniach w okresie 1990-2018

Fig. 3. LHP changes and the trends directions of the flows for analysed catchments in the period 1990-2018

Analiza przeprowadzona za pomocą testu *MMK* wykazała brak znaczących trendów w szeregach czasowych charakterystyk przepływu. W przypadku, gdy statystyka *Z* testu Manna-Kendalla mieściła się wewnątrz obszaru ograniczonego wartościami krytycznymi, dla poziomu istotności  $\alpha = 0,05$  (od -1,96 do 1,96) przyjmowano hipotezę *H0* o braku trendu monotonicznego. W przypadku przepływów *NQ* w 22 zlewniach (67% wszystkich analizowanych zlewni) obserwowano trend malejący, a w 11 zlewniach rosnący. Istotnie statystyczny trend malejący przepływów *NQ* zaobserwowano jedynie w zlewni C20 (Raba) a istotny trend rosnący w dwóch zlewniach: C11 (Wisła) i C25 (Grajcarek). Porównując zmiany wartości *LHP* (tablica 3), statystycznie istotne trendy przepływów *NQ* mają logiczne uzasadnienie. W zlewni C20 (Raba) *LHP* zmniejszył się z 8,02 w 1990 r. do 7,85 w 2018 r. Jak wspomniano – zmniejszenie lesistości ma negatywny wpływ na wielkość retencji wody, głównie w rejonach aluwialnych ze względu na niższe wzniesienie zwierciadła wód podziemnych na obszarach w pobliżu cieków. Przy dodatnich trendach temperatury, a tym samym parowania, stany wody gruntowej obniżają, a w konsekwencji zmniejsza się przepływ w cieku w okresie niżówek. W obu zlewniach *LHP* wzrósł: z 19,50 w 1990 r. do 20,15 w 2018 r. w zlewni Wisły (C11) oraz z 7,76 w 1990 r. do 7,90 w 2018 r. w zlewni Grajcarek (C25). Wzrost *LHP*, a tym samym większe zdolności retencyjne w obu zlewniach zmniejsza amplitudę wahań poziomu wód gruntowych; w ten sposób przepływ niski wykazywał tendencję rosnącą. W konsekwencji wzrost *LHP* ma pozytywne znaczenie w aspekcie występowania niżówek rzecznych zwłaszcza na południu Polski (Baran-Gurgul, Kołodziejczyk 2020, Rutkowska, Baran-Gurgul 2020).

Podobnie jak w przypadku przepływu *NQ*, większość trendów przepływów *SQ* w badanych zlewniach jest statystycznie nieistotna. Osiemnaście zlewni (54% wszystkich analizowanych zlewni) ma trend malejący przepływów *SQ*, 12 zlewni (36%) wykazuje tendencję do wzrostu *SQ*, a trzy zlewnie (10%) nie wykazują trendu. Jedynie w dwóch zlewniach występuje statystycznie istotny trend malejący przepływu *SQ*: C9 – Uszwica i C18 – Lubieńka. W obu przypadkach zmniejszył się również *LHP*: z 6,45 w 1990 r. do 6,11 w 2018 r. w Uszwicy oraz z 6,78 w 1990 r. do 6,54 w 2018 r. w Lubieńce. Ponieważ średni przepływ zależy głównie od warunków klimatycznych i geologicznych, zmniejszenie *LHP* wpływa na zmniejszanie wartości przepływów *SQ*.

Jedynie zlewnia C8 (Szreniawy) wykazuje rosnący, istotny statystycznie trend przepływu *SQ*. W tym przypadku *LHP* ma odwrotną relację do średniego trendu przepływu. W zlewni C8 *LHP* zmienił się z 7,08 w 1990 r. do 6,50 w 2018 r. Zlewnia Szreniawy ze względu na znaczną powierzchnię (> 700 km<sup>2</sup>, tablica 1), relatywnie niewielki spadek i bardziej przepuszczalne podłoże ma sprzyjające warunki do opóźnienia odpływu, a tym samym większej retencji wody, co jest czynnikiem prowadzącym do zmniejszenia zmienności przepływu. Generalnie reżim hydrologiczny zlewni będących lewostronnymi dopływami Wisły ma wykazuje mniejszą bezwładność do warunków klimatycznych (Wałęga i Młyński 2017).

W przypadku przepływów *WQ* wykazano, podobnie jak w przypadku przepływów *NQ* i *SQ*, nieistotne statystycznie trendy w większości analizowanych zlewni. Tylko trzy zlewnie – C22, C21 i C16 – charakteryzowały się wyraźnymi trendami. W 23 zlewniach (70% wszystkich analizowanych zlewni) występuje trend rosnący *WQ*, w 8 przypadkach (24%) trend malejący, w 2 przypadkach (6%) trendu nie stwierdzono. Trend rosnący przepływów *WQ* może sugerować tendencję do wzrostu ryzyka powodziowego. Dorzecze górnej Wisły jest najbardziej zasobnym w wodę regionem Polski, a także jednym z najbardziej podatnych regionów na występowanie powodzi (Rutkowska i in. 2017).

W zlewniach C21 i C22 wykazano statystycznie istotny trend przepływów  $WQ$ . W obu przypadkach  $LHP$  zmniejszył się: z 6,91 w 1990 r. do 6,82 w 2018 r. dla C21 oraz z 10,33 w 1990 r. do 9,69 w 2018 r. dla C22. Wzrost stopnia antropopresji powoduje spadek wartości  $LHP$  i wzrost przepływu  $WQ$ . W przypadku zlewni C5, w której obserwuje się wylesienie i pustynnienie,  $LHP$  uległ zmniejszeniu. Wpływało to na wzrost wartości przepływu  $WQ$ . Dla silnie zurbanizowanej zlewni C7,  $LHP$  zmniejszył się i w konsekwencji przepływ  $WQ$  również wykazuje trend rosnący. W tym przypadku wyraźnie zaznaczyła się negatywna rola obszarów nieprzepuszczalnych co przyczynia się do zwiększenia zagrożenia powodziowego.

#### 4. PODSUMOWANIE

W pracy przeprowadzono ocenę zmian  $LULC$  i ich wpływu na wartość  $LHP$ . Analizy przeprowadzono w 33 zlewniach zlokalizowanych w dorzeczu górnej Wisły w okresie 1990-2018. Zidentyfikowano cztery przypadki tendencji zmian udziału poszczególnych klas użytkowania: (1) brak zmiany klasy  $LULC$ , (2) rosnący udział danej klasy  $LULC$ , (3) malejący udział danej klasy  $LULC$  oraz (4) skokowe zmiany danej klasy  $LULC$ . Zaobserwowano pozytywną tendencję w zakresie wzrostu lesistości w kontekście  $LHP$ , a także negatywną tendencję w zwiększaniu udziału zabudowy miejskiej rozproszonej. W analizowanym okresie  $LHP$  zmniejszył się w 21 zlewniach, a wzrósł w 12 zlewniach. Spadek  $LHP$  został spowodowany zmianami  $LULC$ , zazwyczaj w kierunku wzrostu udziału gruntów ornych i zabudowy zwartej oraz rozproszonej. Wzrost  $LHP$  był niewielki i spowodowany głównie zwiększaniem lesistości zlewni. Generalnie  $LHP$  zmniejszył się w zlewniach położonych w lewobrzeżnej części dorzecza Wisły, gdzie panują korzystniejsze warunki dla rolnictwa, rozwijającego się przemysłu i obszarów miejskich. W oparciu o przeprowadzone analizy wykazano, że występują statystycznie istotne zmiany trendów przepływów  $NQ$ ,  $SQ$  i  $WQ$ , które można powiązać ze zmianami  $LHP$ . Największe zmiany w trendach przepływów występują głównie w zlewniach górnego Dunajca i górnej Raby. Obniżenie wartości  $LHP$  wskazuje, że w zlewniach zmniejsza się zdolność zatrzymania opadu poprzez zmniejszenie możliwości infiltracji co objawia się zmniejszaniem przepływów niskich i zwiększaniem wysokich. Na podstawie przedstawionych badań można stwierdzić, że  $LHP$  jest kompleksowym wskaźnikiem charakteryzującym potencjał retencyjny zlewni, który uwzględnia kluczowe parametry zlewni jak warunki hydrogeologiczne, klimatyczne, orografię czy użytkowanie terenu wpływające na opóźnienie odpływu i wielkość retencji. W tym kontekście  $LHP$  może być wykorzystany do wykrywania wpływu zmian pokrycia terenu na zasoby wodne w zlewniach, a zatem może być potencjalnym narzędziem wspierającym zarządzanie zasobami wodnymi w skali lokalnej, regionalnej i globalnej.

#### BIBLIOGRAFIA

- Baran-Gurgul K., Kołodziejczyk K. 2020, *Temporal and spatial variability of the lowest and highest average annual outflows in Poland in the period 1969-2018*. 6th IAHR Europe Congress, June 30th – July 2nd, 2020, Warsaw, Poland.
- Bogdał A., Wałęga A., Kowalik T., Cupak A. 2019, *Assessment of the Impact of Forestry and Settlement-Forest Use of the Catchments on the Parameters of Surface Water Quality: Case Studies for Chechło Reservoir Catchment, Southern Poland*. Water, 11, s. 1-23.
- Conrad O., Bechte, B., Bock M., Dietrich H., Fischer E., Gerlitz L., Wehberg J., Wichmann V., Böhner J. 2015, *System for automated geoscientific analyses (SAGA) v. 2.1. 4*. Geosci. Model. Dev. Discuss. 8(2), s. 1-17.

- De Fries R.S., Foley J.A., Asner G.P. 2004, *Land-Use Choices: Balancing Human Needs and Ecosystem Function*. Front. Ecol. Environ. 2, s. 249–257.
- Kibii J.K., Kipkorir E.C., Kosgei J.R. 2021, *Application of Soil and Water Assessment Tool (SWAT) to Evaluate the Impact of Land Use and Climate Variability on the Kaptagat Catchment River Discharge*. Sustainability 13, s. 1-19.
- Lepeska T., 2010, *Hydric potential of landscape and integrated river basin management in mountain and submontane regions*. Ecohydrol. Hydrobiol. 2010, 10, s. 13–24.
- Lepeska, T. 2013, *Hydric potential of selected river basins in Slovakia*. Ecohydrol. Hydrobiol. 13(3), s. 201-209.
- Lepeska T., Radecki-Pawlik A., Wojkowski J., Wałęga A., 2017, *Hydric potential of the river basin: Prądnik, Polish Highlands*. Acta Geoph., 65(6), s. 1253-1267.
- Lepeska T., Wojkowski J., Wałęga A., Młyński D., Radecki-Pawlik A., Olah B., 2020, *Urbanization-Its Hidden Impact on Water Losses: Prądnik River Basin, Lesser Poland*. Water 12(7), s. 1-18.
- Majlingová A., Závacká M., Kliment D., 2012, *An assessment of Hucava mountain stream catchment susceptibility to flooding*. J. For. Sci. 58(12), s. 553-559.
- Młyński D., Wałęga A., Bugajski P., Operacz A., Kurek K. 2019, *Verification of empirical formulas for calculating mean low flow with the view to evaluating available water resources*. Acta Sci. Pol. Form. Circumiectus, 18(2), s. 83-92
- Muwamba A., Amatya D.M., Ssegane H. Chescheir G.M., Appelboom T., Nettles J.E., Tollner E.W., Youssef M.A., Wałęga A., Birgand F. 2020, *Response of Nutrients and Sediment to Hydrologic Variables in Switchgrass Intercropped Pine Forest Ecosystems on Poorly Drained Soil*. Water Air Soil Pollut. 231, s. 2-21.
- Petrovič F., Stránovský P., Muchová Z., Falňan V., Skokanová H., Havlíček M., Gábor M., Špulerová J. 2017, *Landscape-ecological optimization of hydric potential in foothills region with dispersed settlements – a case study of Nová Bošáca. Slovakia*. Appl. Ecol. Env. Res. 15(1), s. 379-400.
- Rutkowska A., Baran-Gurgul K. 2020, *Variability of the dates of occurrence of low flows in the Upper Vistula river basin*. 6th IAHR Europe Congress, June 30th – July 2nd, 2020, Warsaw, Poland
- Rutkowska A., Żelazny M., Kohnova S., Łyp M., Banasik K. 2017, *Regional L-moment based flood frequency analysis in the upper Vistula River basin, Poland*. Pure Appl. Geophys. 174, s. 701–721. <https://doi.org/10.1007/s00024-016-1298-8>.
- Šatalová B., Kenderessy P. 2017, *Assessment of water retention function as tool to improve integrated watershed management (case study of Poprad river basin, Slovakia)*. Sci. Total Environ. 599, s. 1082-1089.
- Šatalová B. 2016, *Hydric significance of landscape in a mountain river basin*. [w:] Koulov, B., Zhelezov, G. (red.), Sustainable Mountain Regions: Challenges and Perspectives in Southeastern Europe. Springer, Cham.
- Stránovský P. 2013, *Present landscape structure elements in attitude to landscape hydric potential in Bošáca valley*. Mendel. Net. 492-498.
- Turc, L., 1961. *Evaluation des besoins en eau d'irrigation, évapotranspiration potentielle*. Annales Agronomiques, 12 (1), 13-49.
- Viola M.R., Mello C.R., Beskow S., Norton L.D. 2014, *Impacts of land-use changes on the hydrology of the Grande river basin headwaters, Southeastern Brazil*. Water Resour. Manag. 28(13), s. 4537–4550 .
- Wałęga A., Młyński D. 2017, *Seasonality of median monthly discharge in selected carpathian rivers of the upper Vistula basin*. Carpathian Journal of Earth and Environmental Sciences, 12 (2), s. 617-628
- Wałęga A., Młyński D., Wojkowski J., Radecki-Pawlik A., Lepeska T. 2020, *New Empirical Model Using Landscape Hydric Potential Method to Estimate Median Peak Discharges in Mountain Ungauged Catchments*. Water 12, s. 1-18.
- Wang Y., Zhang X., Peng P. 2021, *Spatio-Temporal Changes of Land-Use/Land Cover Change and the Effects on Ecosystem Service Values in Derong County, China, from 1992–2018*. Sustainability 13, s. 1-16.
- [www.danepubliczne.imgw.pl](http://www.danepubliczne.imgw.pl)
- Wojkowski J., Młyński D., Lepeska T., Wałęga A., Radecki-Pawlik A. 2019, *Link between hydric potential and predictability of maximum flow for selected catchments in Western Carpathians*. Science of the Total Environment 683, s. 293-307.

