

WPŁYW URBANIZACJI NA ZMIANY HYDROGRAMU ODPIYWU W ZLEWNI ŻYLICZY (BESKIDY ZACHODNIE)

SZYMON HOLEKSA¹, MATEUSZ RACIOK¹, DAMIAN ABSALON²

¹Katedra Geologii Stosowanej, ²Katedra Geografii Fizycznej,
Wydział Nauk o Ziemi w Sosnowcu, Uniwersytet Śląski w Katowicach,
ul. Będzińska 60, 41-200 Sosnowiec

Abstract: Mathematical models which transfer downfall to surface runoff are applied for a catchment whose area is smaller than 50 km² and where high-water stages are caused by rainfall. The aim of the paper was to investigate changing hydrographs as a result of increasing urbanization. Calculations were performed using models which transfer effective rainfall into surface runoff. The modelling was carried out for three different periods which were characterized by different use: historical, current and predicted. Effective rainfall was transferred into surface runoff using Snyder's model. Retention was calculated by SCS-CN model.

Keyword: Snyder's model, modelling, urbanization, anthropogenic impact

WSTĘP

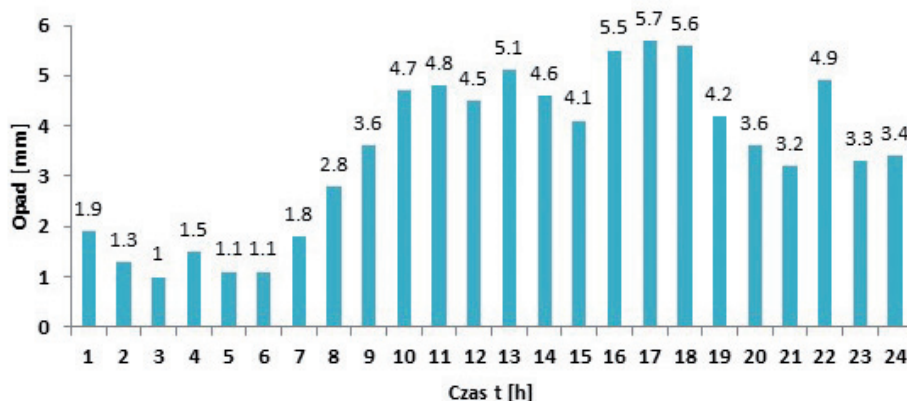
Sposób zagospodarowania terenu znacząco wpływa na charakter hydrologiczny zlewni, a szczególnie istotnym aspektem jest wzrost urbanizacji. Pomimo że obszary miejskie i wiejskie zajmują tylko około 2% powierzchni lądu, szacuje się, iż do roku 2030 około 60% populacji zamieszkiwać będzie tereny zurbanizowane, których powierzchnia wzrośnie trzykrotnie (Bartnik 2016). Tendencja ta ma swoje odzwierciedlenie w postaci zmian hydrogramu odpływu w zlewniach cechujących się zmieniającym się zagospodarowaniem terenu. W zlewniach, których powierzchnia nie przekracza około 50 km², a wezbrania mają charakter opadowy, zastosowanie znajdują modele opad–odpływ wykorzystywane do obliczeń transformacji opadu efektywnego w odpływ powierzchniowy. Na podstawie opadu efektywnego jest wyznaczany hydrogram jednostkowy, który służy do obliczania hydrogramu odpływu. Opad efektywny jest definiowany jako opad całkowity pomniejszony o straty początkowe, będące rezultatem między innymi intercepcji, infiltracji oraz ewapotranspiracji (Banasik 2014). Problem wpływu urbanizacji na odpływ był podejmowany już w latach 60. XX w. (Espey i in. 1965; Sarma i in. 1969) i wciąż stanowi temat wielu opracowań.

METODY PRACY

Głównym celem pracy jest wyznaczenie zmiany hydrogramu odpływu zachodzącej pod wpływem wzrostu urbanizacji na podstawie modeli transformujących opad efektywny w odpływ powierzchniowy. Modelowanie wykonano dla trzech okresów różniących się sposobem zagospodarowania (historycznego, aktualnego oraz prognozowanego). W każdym przypadku do modelowania wykorzystano jednakową sumę opadu zarejestrowaną na posterunku IMGW w Szczyrku.

Retencję zlewni wyznaczono na podstawie modelu SCS-CN. W metodzie tej uwzględnia się: sposób zagospodarowania zlewni, rodzaj gleb, typ pokrycia roślinnego, warunki hydrologiczne oraz stopień uwilgotnienia gleby oparty na danych opadowych z pięciu dni poprzedzających właściwy pomiar (Kołodziejczyk 2016).

Właściwości retencyjne zlewni charakteryzuje bezwymiarowy parametr *CN*, którego wartość waha się od 1 (powierzchnia doskonale przepuszczalna) do 100 (powierzchnia nieprzepuszczalna). Parametr *CN* jest wyznaczany na podstawie powierzchni objętych poszczególnymi rodzajami zagospodarowania terenu oraz przyporządkowania ich do jednej z czterech kategorii glebowych charakteryzujących się zmienną przepuszczalnością. Charakterystykę przepuszczalności wykonano na podstawie *Mapy hydrograficznej Polski* w skali 1 : 50 000 (2003). Dla modelu prognozowanego założono brak zmian glebowych. W przypadku modelu historycznego charakter gleb wyznaczono, zakładając, że gleby zmienione antropogenicznie należą do tej samej klasy gleb, wokół których występują.



Ryc. 1. Rozkład opadu na posterunku w Szczyrku użyty do opracowania (na podstawie danych IMGW-PIB)

Fig. 1. Rainfall for Szczyrk precipitation station which was used

Sposób zagospodarowania terenu dla modelu historycznego wykonano na podstawie mapy *Umgebung von Biala, Kenty und Saybusch* (arkusz nr 15), pochodzącej z austro-węgierskiej mapy *Galizien und Lodomerien* (1855), znajdującej się w Archiwum Map Wojskowego Instytutu Geograficznego. Mapie tej nadano georeferencje w celu umożliwienia jej porównania z mapą współczesną. W modelu aktualnym wykorzystano dane pochodzące z projektu Corine Land Cover (CLC, 2012), w którym zagospodarowanie terenu określono na podstawie zdjęć satelitarnych – wydzielono 44 typy zagospodarowania terenu, m.in. tereny przemysłowe i handlowe, budowlane, rolnicze (Bielecka 2004). Dane uzyskane z CLC poprawiono zgodnie z informacjami znajdującymi się w miejscowym planie zagospodarowania przestrzennego miasta Szczyrk. Model prognozowany wykonano na podstawie planu zagospodarowania przestrzennego na lata 2020–2022. Zaznaczono w nim tereny, które zostaną przekwalifikowane z rolnych w budowlane, co było podstawą do poszerzenia powierzchni terenów zabudowanych w modelu prognozowanym.

Transformacje opadu efektywnego w odpływ powierzchniowy wykonano na podstawie modelu Snydera. W modelu tym odpływ jest wyznaczany na podstawie hydrogramu jednostkowego. Parametrami niezbędnymi do wyznaczenia hydrogramu odpływu są: powierzchnia zlewni, retencja, długość cieku, odległość od środka ciężkości oraz dane opadowe. W celu wyznaczenia hydrogramu jednostkowego w modelu Snydera należy ustalić przepływ kulminacyjny, czas opóźnienia oraz czas do wystąpienia kulminacji (Ponce 1989).

Czas opóźnienia jest określony następującym równaniem (Nicklow 2006):

$$T_L = 0,75C_t(L_{\max L_c})^{0,3}$$

gdzie:

T_L – czas opóźnienia [godz.],

C_t – współczynnik uzależniony od spadku zlewni oraz związany z retencją zlewni,

$L_{\max L_c}$ – długość zlewni [km],

L_c – odległość wzdłuż głównego cieku od przekroju ujściowego do środka ciężkości zlewni [km]. Przepływ kulminacyjny obliczono na podstawie następującej zależności (Nicklow 2006):

$$Q_p = \frac{0,275 \cdot C_p \cdot A}{T_L}$$

gdzie:

Q_p – przepływ kulminacyjny hydrogramu jednostkowego spowodowany opadem efektywnym o wysokości 1 cm [$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$],

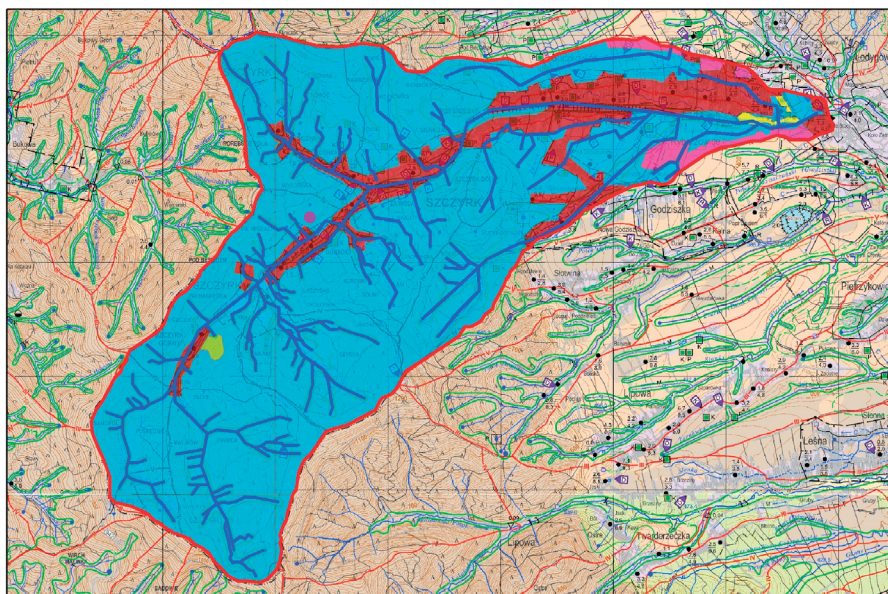
A – powierzchnia zlewni [km^2],

C_p – współczynnik empiryczny.

OBSZAR OPRACOWANIA

Zlewnia Żylicy należy do prawostronnego dorzecza Wisły, jest lewym dopływem Soły (obecnie zbiornika wodnego Tresna – Jez. Żywieckiego). Pod względem fizycznogeograficznym zlewnia Żylicy leży w obrębie prowincji Karpat, podprowincji Zewnętrzne Karpaty Zachodnie, w makroregionie Beskidów Zachodnich oraz mezoregionów Beskid Śląski, Beskid Mały i Kotlina Żywiecka (Kondracki 1994).

Pod względem administracyjnym zlewnia Żylicy znajduje się w województwie śląskim, jedna jej część leży w powiecie bielskim (Szczyrk i Buczkowice), druga w powiecie żywieckim (Łodygowice i Lipowa).



mapa została utworzona na podstawie danych z www.geoportal.gov.pl

0 1,25 2,5 5 Km

Legenda

- sieć rzeczna w zlewni Żylicy
- dział wodny zlewni Żylicy
- lokalizacja posterunku opadowego

Klasy przepuszczalności:

- 1 - grunty o łatwej przepuszczalności
- 2 - grunty o średniej przepuszczalności
- 3 - grunty o słabej przepuszczalności
- 5 - grunty o zróżnicowanej przepuszczalności
- 6 - grunty o bardzo słabej przepuszczalności

Ryc. 2. Szkic hydrograficzny zlewni Żylicy do profilu w Łodygowicach

Fig. 2. Hydrographic sketch of Żylica catchment to profile in Łodygowice

Żylica bierze początek na północnych stokach Malinowskiej Skały, przepływa przez Szczyrk w kierunku północno-wschodnim i na wysokości 342 m n.p.m. uchodzi do Jeziora Żywieckiego, jednego ze zbiorników zaporowych kaskady Soły (Janus i in. 2009). Jej długość wynosi 21,8 km, a na analizowanym odcinku 18,54 km. Rzeźba tej części Beskidów ma charakter średniogórski (Klimaszewski 1972). Na obszarze zlewni średnie roczne temperatury wynoszą od $+4^{\circ}\text{C}$ w górnych do $+8^{\circ}\text{C}$ w dolnych partiach. Średnia roczna suma opadów w Szczyрку wynosi 1200 mm, a w najwyższych partiach powyżej 1300 mm (Atlas..., 2000). Z danych z rejestru ludności z 1854 r. wiadomo, iż Szczyrk zamieszkiwało 1540 mieszkańców w 234 domach, które skupiono w pobliżu rzeki. Według aktualnych danych z Wojewódzkiego Urzędu Statystycznego w Katowicach liczba ludności miasta w 2015 r. wynosiła 5715 (Vademecum, 2016).

WYNIKI

Otrzymane wyniki pokazano na rycinie 3. Sposób zagospodarowania terenu, wyznaczony na podstawie modelu SCS-CN, zaprezentowano za pomocą diagramu kołowego. Dla każdego z rozpatrywanych modeli przedstawiono hydrogramy odpływu. Dla poszczególnych modeli odnotowano różnice w hydrogramach odpływu oraz w opadzie efektywnym. Całkowity opad wykorzystany do modelu wyniósł 83,3 mm. W przypadku modelu historycznego 32 mm opadu jest transformowane w opad efektywny, co stanowi 38,4% całego opadu. Dla modelu aktualnego oraz prognozowanego wartość ta wynosi odpowiednio: 37 mm i 37,6 mm, co stanowi odpowiednio: 44,5% oraz 45,2% całkowitego opadu. W przyjętym sposobie modelowania zmiana wartości opadu efektywnego jest uzależniona wyłącznie od maksymalnej retencji zlewni.

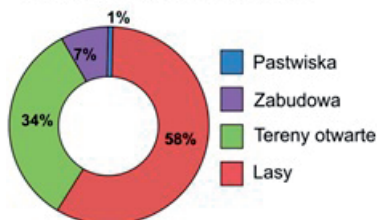
Zagospodarowanie zlewni Żylicy w XIX w. charakteryzowało się dużym udziałem lasów (58%) oraz terenów otwartych (34%). Obserwuje się jest niewielki udział pastwisk (1%) i terenów zabudowanych (7%). Retencja zlewni w tym okresie przyjmuje największą wartość spośród analizowanych – 76,6 mm, a parametr *CN* wyniósł 76,83. Suma opadu efektywnego wynosiła 32 mm, a przepływ maksymalny osiągał wartość $30,85 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$.

Obecnie 19% powierzchni zlewni stanowią tereny zabudowane. Nie zanotowano zmniejszenia powierzchni lasów, jednakże znacząco zmieniła się powierzchnia terenów otwartych (4%). Wzrosła powierzchnia zajmowana przez pastwiska (21%). Wartość retencji wynosi 63,78 mm przy *CN* równym 79,93. Wartość maksymalna przepływu to $35,04 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$.

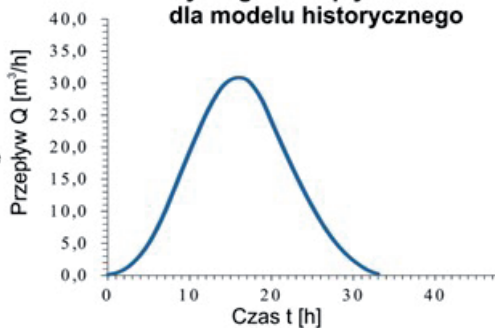
Dla prognozowanego modelu, opartego na planach zagospodarowania przestrzennego, jest obserwowany wzrost powierzchni zabudowanej o 3% przy spadku powierzchni pastwisk. Nieznacznie zmienia się powierzchnia terenów

Wyniki modelowania

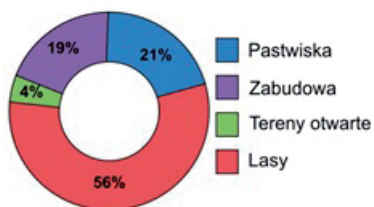
Zagospodarowanie terenu dla modelu historycznego



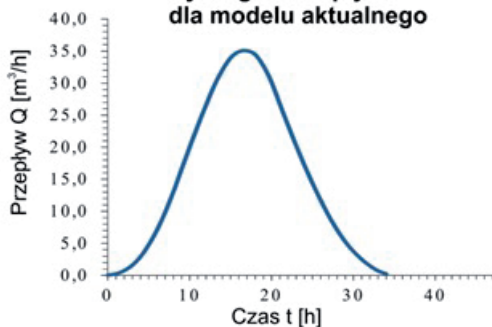
Hydrogram odpływu dla modelu historycznego



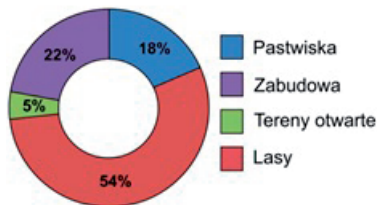
Zagospodarowanie terenu dla modelu aktualnego



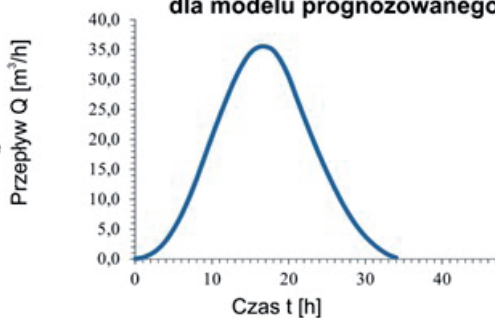
Hydrogram odpływu dla modelu aktualnego



Zagospodarowanie terenu dla modelu prognozowanego



Hydrogram odpływu dla modelu prognozowanego



Ryc. 3. Uzyskane wyniki z modelowania
Fig. 3. The result from predicted model

otwartych oraz zalesionych. Prognozowana retencja wynosi 62,43 mm dla *CN* równego 80,3. Przepływ osiąga wartość maksymalną równą $35,5 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$.

WNIOSKI

Zmiana sposobu zagospodarowania wpływa na kształt hydrogramu odpływu, co obrazuje różnica między maksymalnymi wartościami przepływów dla modelu historycznego ($30,85 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) oraz prognozowanego ($35,5 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$). Głównym czynnikiem wpływającym na zmianę warunków hydrologicznych jest wzrost stopnia zurbanizowania terenu, który jest uzależniony również od zwiększonej aktywności turystycznej i budowy związanej z tym infrastruktury w regionie. Istotnym czynnikiem wpływającym na możliwości retencyjne zlewni jest charakterystyka obszarów zabudowanych (przepuszczalności powierzchni). Drogi, chodniki, a w szczególności kanalizacja deszczowa skracają czas relacji opad–odpływ. Innym czynnikiem wpływającym na właściwości retencyjne zlewni Żylicy są niskiej jakości gleby (kategoria C i D), które zajmują ponad 98% obszaru. Warto zauważyć, że procentowy udział lasów nie zmniejszył się znacząco na przestrzeni ponad 150 lat (od 1855 r.). Tereny w przeszłości otwarte zostały zagospodarowane, zmieniając swoją powierzchnię o 30%. Model SCS-CN wykazuje najlepszą zdolność retencyjną dla terenów jedynie w przypadku dobrego pokrycia roślinnością. Istotna jest dokładna znajomość charakterystyki lasów. Las rzadki charakteryzuje się niższymi zdolnościami retencyjnymi niż przestrzenie otwarte o powierzchni pokrytej trawą większej niż 75%. Rezultaty dla historycznego zagospodarowania terenu są obciążone największym błędem wynikającym z jakości danych wejściowych. Na ówczesnej mapie klasyfikacja obejmowała: tereny otwarte, pastwiska, lasy oraz zabudowę. Poważnym problemem było określenie charakterystyki lasów i pokrycia ze względu na skąpe informacje dotyczące drzewostanu w XIX w. Model przedstawiający aktualnie panujące warunki hydrologiczne cechuje się najmniejszym błędem ze względu na najwyższą jakość danych wejściowych. Sposób zagospodarowania terenu oraz mapy glebowe prezentują wysokiej jakości dane.

Dużą zaletą wykorzystanych metod jest uwzględnienie geometrycznych parametrów zlewni, charakterystyki glebowej oraz sposobu użytkowania terenu. W tym przypadku wyznaczana retencja uwzględnia sumę opadów z pięciu dni poprzedzających opad, co odzwierciedla rzeczywiste możliwości retencyjne w zależności od stopnia nasycenia gruntu. Wadą modelu SCS-CN jest subiektywizm wynikający z braku jednoznacznie ustalonych granic między jakością zagospodarowania terenu, czego wiarygodnym przykładem są parametry modelu dla terenów leśnych i otwartych. Model Snydera nie uwzględnia morfologicznej charakterystyki obszaru, która ma znaczny wpływ na szybkość spływu powierzchniowego. Charakter hydrogramu odpływu jest kształtowany również

na podstawie sposobu rozmieszczenia terenów zalesionych (Bogusz, Tokarczyk, 2016), czego nie uwzględniają zastosowane modele.

Wzrost powierzchni terenów zurbanizowanych ma swoje realne odzwierciedlenie w zmianie hydrogramu odpływu. Zastosowanie matematycznych modeli do opisu wspomnianego zjawiska stanowi użyteczne narzędzie zarówno w kontekście obecnych, jak i przyszłych zmian w zlewni. Czynnikiem warunkującym jakość otrzymanych wyników są dane wejściowe, których pozyskanie stanowi poważny problem w przypadku modelowania historycznych oraz prognozowanych zależności. Poprawa jakości obecnych modeli i coraz większy dostęp do danych pozwalają na określenie relacji opad–odpływ za pomocą większej liczby parametrów. Kwestia ta implikuje problematykę modelowania historycznych relacji, gdzie dane często mają charakter opisowy, brak w nich liczbowych wartości, które z powodzeniem można by wykorzystać. Szeroki zakres możliwości zagospodarowania terenu z niekompletnymi danymi powoduje spadek wiarygodności uzyskanych wyników. W tym przypadku kluczowe jest, aby przyjęty subiektywizm był silnie obiektywny naukowo. Zmiany w hydrogramie odpływu są szczególnie widoczne w przypadku zjawisk ekstremalnych. Zatem modelowania matematyczne z planami zagospodarowania przestrzennego mogą zostać z powodzeniem wykorzystane do zmniejszenia ryzyka powodziowego.

LITERATURA

- Atlas klimatu województwa śląskiego*, 2000: IMiGW, Katowice.
- Banasik K., 2009: *Wyznaczanie wezbrań powodziowych w małych zlewniach zurbanizowanych*, Wyd. SGGW, Warszawa.
- Bartnik A., 2016: *Monografie Komitetu Gospodarki Wodnej PAN*, Warszawa.
- Bielecka E., Ciołkosz A., 2004: *Metodyczne i realizacyjne aspekty aktualizacji bazy Corine*, Prace Instytut Geodezji i Kartografii, t. L, z. 108.
- Espey W.H., Morgan C.W., Masch F.D., 1966: *A study of some effects of urbanization on storm runoff from a small watershed*, Report No. 23, Texas Water Development Board, Austin, Texas.
- Jankowski A.T., Ruman M., 2009: *Charakterystyka hydrologiczna i ocena stopnia antropogenicznego przekształcenia zlewni Żyłicy*, [w:] A.T. Jankowski, D. Absalon, R. Machowski, M. Ruman (red.), *Przeobrażenia stosunków wodnych w warunkach zmieniającego się środowiska*, Wyd. Nauk o Ziemi Uniwersytetu Śląskiego w Sosnowcu, Polskie Towarzystwo Geograficzne Oddział Katowicki, Regionalny Zarząd Gospodarki Wodnej, Gliwice.
- Klimaszewski M., 1972: *Geomorfologia Polski. Polska Południowa. Góry i wyżyny*, t. 1, PWN, Warszawa.
- Kołodziejczyk K., 2016: *Analiza wpływu wielkości uszczelnienia terenu na hydrogram odpływu ze zlewni*, Ac. Sc. Pol. *Formatio Circumietus*, 15(4), 103–114.
- Kondracki J., 1994: *Geografia Polski. Mezoregiony fizycznogeograficzne*, Wyd. Nauk. PWN, Warszawa.
- Land Cover, 2012: Pr. Inst. Geodezji i Kartografii, t. L, z. 108.
- Mapa hydrograficzna Polski w skali 1 : 50 000*, ark. M-34–75-C (Bielsko-Biała), 2003: Główny Geodeta Kraju, Warszawa.

- Nicklow W.J., 2006: *Comprehensive Urban Hydrologic Modeling Handbook for Engineers and Planners*, MWH Soft, Incorporated.
- Ponce M.V., 1989: *Engineering Hydrology: Principles and Practices*, Prentice Hall.
- Sarma P.B.S., Delleur J.W., Rao A.R., 1969: *A Program in Urban Hydrology. Cz. II. An Evaluation of Rainfall-Runoff Models for Small Urbanized Watersheds and the Effect of Urbanization on Runoff*, Technical Report No. 9. Purdue Water Resources Center, Purdue University, Lafayette.
- Statystyczne vademecum samorządowca*, 2016: Urząd Statystyczny w Katowicach, Katowice.
- Umgebung von Biala, Kenty und Saybusch, 1855: *Hominiftrativ Karte von den Königreichen Galizien und Lodomerien*, ark. 15, Archiwum Map Wojskowego Instytutu Geograficznego.