INFRASTRUKTURA I EKOLOGIA TERENÓW WIEJSKICH
INFRASTRUCTURE AND ECOLOGY OF RURAL AREAS

Nr 2/I/2012, POLSKA AKADEMIA NAUK, Oddział w Krakowie, s. 65–73
Komisja Technicznej Infrastruktury Wsi

Agnieszka Cupak, Andrzej Wałęga

WYKORZYSTANIE SYNTETYCZNEGO HYDROGRAMU JEDNOSTKOWEGO NRCS ORAZ KONCEPTUALNEGO MODELU WACKERMANA DO SYMULACJI FALI WEZBRANIOWEJ W ZLEWNI NIEKONTROLOWANEJ

USE OF NRCS COMPOSITE UNIT HYDROGRAPH AND CONCEPTUAL WACKERMAN'S MODEL FOR SIMULATION OF FLOOD HYDROGRAPH IN UNCONTROLLED CATCHMENT

Streszczenie

Duża liczba niewielkich i niekontrolowanych zlewni skłania do poszukiwania metod, pozwalających na określenie zasobów wodnych. W przypadku zlewni, w których nie dysponuje się danymi hydrologicznymi wykorzystuje się metody pośrednie: analityczne które jednak obarczone są dużym błędem, lub ostatnio coraz bardziej popularne modele matematyczne.

Celem pracy było określenie przepływów maksymalnych o prawdopodobieństwie wystąpienia wynoszącym: 0,5%, 1%, 2%, 5%, 10%, 20% i 50%, w zlewni niekontrolowanej Sielskiego Potoku, z wykorzystaniem konceptualnego modelu Wackermana oraz syntetycznego hydrogramu jednostkowego NRCS, dla dwóch poziomów uwilgotnienia zlewni.

Uzyskane wyniki wykazały różnice w wartościach przepływów maksymalnych prawdopodobnych. W przypadku modelu Wackermana otrzymano typowy hydrogram wezbrania charakteryzujący rzeki górskiej, natomiast w przypadku modelu NRCS-UH fala wezbraniowa nie oddawała w pełni górskiego charakteru rzeki Sielski Potok. W obydwu metodach wartości przepływów maksymalnych malały wraz ze wzrostem prawdopodobieństwa.

Słowa kluczowe: model Wackermana, metoda NRCS-UH, opad efektywny, zlewnia niekontrolowana

Summary

Plural number of small and uncontrolled catchments tends to find methods, which allow describing water resources. In case of catchments, in which there is no hydrological information some indirect methods are used: analytical which are loaded of big error, or lately increasingly popular mathematical models.

The aim of the paper was to describe maximum flows with probability of exceed: 0,5%, 1%, 2%, 5%, 10%, 20% and 50% in uncontrolled catchment of Sielski Potok, with use of conceptual Wackerman's model and NRCS composite unit hydrograph, for two level of catchment's moisture.

The results show differences in maximum flow values. In case of Wackerman's model the typical flood hydrograph for mountainous river were got, but in NRCS-UH, the flood hydrograph does not fully give mountainous character of Sielski Potok river. In both methods with probability increase, the values of maximum flows decreased.

***Key words**: Wackerman's model, NRCS-UH method, effective precipitation, uncontrolled catchment*

WSTĘP I CEL PRACY

Ciągły rozwój powoduje coraz większe zapotrzebowanie na badania niewielkich zlewni ze względu na projektowanie urządzeń służących gospodarce wodnej, kształtowanie zasobów wód powierzchniowych i podziemnych oraz przewidywaniu zróżnicowań stosunków wodnych ze względu na różnorodne zagospodarowanie. Duża liczba niewielkich i niekontrolowanych zlewni skłania do poszukiwania metod pozwalających na określenie wielkości zasobów wodnych. Obecnie najczęściej wykorzystuje się w tym celu modele matematyczne typu opad-odpływ. Model typu opad-odpływ określany jest w oparciu o badania realizowane w zlewniach kontrolowanych i opiera się na określeniu zależności pomiędzy charakterystyką odpływu a parametrami, które mają wpływ na jego wielkość oraz dynamikę, i które można zmierzyć w terenie lub wyznaczyć za pomocą danych kartograficznych.

Celem pracy było określenie przepływów maksymalnych o prawdopodobieństwie wystąpienia wynoszącym: 0,5%, 1%, 2%, 5%, 10%, 20% i 50%, w zlewni niekontrolowanej, z wykorzystaniem konceptualnego modelu Wackermana oraz syntetycznego hydrogramu jednostkowego NRCS. W analizie uwzględniono dwa poziomy uwilgotnienia: II – określany jako przeciętny oraz III – wysoki poziom nawilżenia, charakteryzujący się największą możliwością wystąpienia odpływu powierzchniowego [Ozga-Zielinska, Brzezinski 1994].

METODA OPRACOWANIA

Przed przystąpieniem do analizy określono parametry wyjściowe dla obu modeli. Określenie częstotliwości występowania opadów deszczu o określonym

natężeniu oraz czasie trwania, powinno bazować na obserwacjach meteorologicznych pochodzących ze stacji zlokalizowanych na obszarze zlewni bądź w jej sąsiedztwie, Jednak w przypadku ich braku stosowane są wzory empiryczne. Dla analizowanej zlewni został określony ogólny związek natężenia opadu jako funkcji czasu jego trwania oraz prawdopodobieństwa zdarzenia według Lambora [1971]. Opad o określonym prawdopodobieństwie wystąpienia obliczono dla następujących wartości prawdopodobieństw 0,5; 1; 2; 5; 10; 20; 50%. Wysokość opadu h (% sumy całkowitej) w funkcji czasu trwania t_r (% czasu całkowitego) odpowiadającego różnym typom genetycznym opadów określono dla stacji Wisły według Kupczyk i Suligowskiego [1997].

Parametr CN dla poszczególnych rodzajów użytków i odpowiadającym im powierzchniom, dla II i III poziomu uwilgotnienia zlewni, określono jako wartość średnią ważoną, zgodnie z metodyką opisaną przez Ozgę-Zielińską, Brzezinskiego [1997]. Następnie, obliczono wysokość skumulowanego opadu efektywnego w dowolnej chwili czasu [Ozga-Zielinska, Brzezinski 1997].

Metoda NRCS-UH (była SCS) została opracowana w Stanach Zjednoczonych przez Służbę Ochrony Gleb. Opad efektywny w tej metodzie to część opadu całkowitego, który spływając po powierzchni zlewni zamieniany jest na odpływ powierzchniowy. Jest to nadwyżka wody po zupełnym wypełnieniu retencji początkowej zlewni z uwzględnieniem infiltracji, która występuje podczas trwania opadu. Jest uzależniony od użytkowania terenu, rodzaju gleb w zlewni, stanu początkowego nawilżenia zlewni oraz cech obszarów zalesionych.

Metoda NRCS-UH opiera się na założeniu, że wezbranie zaczyna się gdy wysokość opadu przekroczy wysokość warstwy wody, która jest zatrzymana w procesach infiltracji, intercepcji i retencji powierzchniowej przed rozpoczęciem odpływu powierzchniowego. Część opadu w tych procesach określana jest jako strata początkowa i oznaczana symbolem (Ia). W miarę trwania opadu wzrasta sumowana retencja (F), aż do uzyskania tzw. maksymalnej retencji zlewni (S). Metoda ta zakłada, że stosunek aktualnej sumowanej retencji (F) do retencji maksymalnej (S) równy jest stosunkowi opadu efektywnego (P_{Ef}) do opadu pomniejszonego o stratę początkową [Soczyńska i in. 2003, Ozga-Zielińska, Brzeziński 1997].

Metoda NRCS-UH zalicza się do grupy metody fali jednostkowej. Wielkość przepływu kulminacyjnego wyliczana jest ze wzoru:

$$q_p = \frac{c \cdot A \cdot P_E}{T_p}$$

$$T_p = \frac{D}{2} + T_{lag}$$

gdzie:

T_p – czas wznoszenia się fali kulminacyjnej, [h],
P_E – jednostkowy opad efektywny o wysokości 1 mm,
A – powierzchnia zlewni, [km^2],
T_{lag} – czas opóźnienia, [h], $T_{lag}=\frac{(L \cdot 3{,}28 \cdot 10^{3})^{0{,}8} \cdot \left(\frac{1000}{CN}-9\right)^{0{,}7}}{1900 \cdot \sqrt{I}}$
D – czas trwania opadu efektywnego, [h],
c – parametr, (c=0,208).
L – długość cieku, [km],
CN – parametr CN, [-],
I – spadek zlewni, [%].

Maksymalny odpływ w czasie wezbrania obliczono na podstawie wzoru:

$$Q_{max}=\frac{0{,}208 \cdot A \cdot P_e}{T_p}\ [m^3 \cdot s^{-1}]$$

gdzie:

A – powierzchnia zlewni, [km^2],
P_e – skumulowany opad efektywny, [mm],
T_p – czas koncentracji, [h],

oraz współrzędne fali wezbraniowej:

$$Q_i=y \cdot Q_{max}\ [m^3 \cdot s^{-1}]$$

$$T_i=x \cdot T_p\ [h]$$

gdzie:

x,y – współrzędne przeciętnego hydrogramu.

Model Wackermana jest modelem konceptualnym, składającym się z 2 kaskad i zawierającym 3 parametry (k_1, k_2, β) [Nowicka, Wolska, 2003]:

$$k_1=1{,}283 \cdot \left(\frac{L}{I^{0{,}5}}\right)^{0{,}159}\ [h]$$

$$k_2=0{,}893 \cdot \left(\frac{L}{I^{0{,}5}}\right)^{0{,}379}\ [h]$$

$$\beta=1{,}04 \cdot \left(\frac{L}{I^{0{,}5}}\right)^{-0{,}403}\ [-]$$

gdzie:

k_1, k_2 – współczynniki retencji zbiorników kaskady odpowiednio pierwszej i drugiej, [h],

β – współczynnik rozdziału opadu efektywnego na obie kaskady, [-].

L – długość cieku, [km],

I – spadek cieku, [-].

Rzędne hydrogramu odpływu ze zlewni z wykorzystaniem modelu Wackermana, można obliczyć stosując zasadę superpozycji [Banasik, Ignar 1984]:

$$Q_i = \sum_{j=1}^{min(i,n)} h_k \cdot \Delta H_j \quad [m^3 \cdot s^{-1}]$$

$$k=i-j+1,\ i=0,1;0,2,\ldots,m+n-1$$

gdzie:

Q_i – rzędne hydrogramu odpływu bezpośredniego, $[m^3 \cdot s^{-1}]$,

ΔH_j – cząstkowy opad efektywny w przedziale czasowym, $[mm \cdot h^{-1}]$,

h_i – rzędne hydrogramu jednostkowego, $[m^3 \cdot s^{-1} \cdot mm^{-1}]$,

m – liczba rzędnych hydrogramu jednostkowego,

n – liczba przedziałów czasowych opadu efektywnego.

OBSZAR BADAŃ

Obszar badań stanowiła zlewnia rzeki górskiej - Sielskiego Potoku (prawostronny dopływ Grajcarka), leżąca się w Beskidzie Sądeckim. Powierzchnia zlewni wynosi 7,95 km^2, długość cieku – 7,08 km przy średnim spadku 8,62%. Na terenie zlewni występują dwa rodzaje gleb: mady o różnej przepuszczalności oraz gleby brunatne kwaśne i gleby brunatne wyługowane, o przepuszczalności od średniej do malej [Stachý 1987]. Powierzchnia zlewni jest zróżnicowana pod względem użytkowania. Największą powierzchnie – 6,64 km^2 zajmują lasy iglaste, co stanowi 83% powierzchni zlewni. Drugim rodzajem zagospodarowania, pod względem zajmowanej powierzchni, są grunty orne (0,78 km^2), następnie łąki (0,23 km^2) a najmniejsza tereny zabudowane – 0,3 km^2.

WYNIKI BADAŃ

Na podstawie przeprowadzonych obliczeń przepływów maksymalnych prawdopodobnych z wykorzystaniem modelu Wackermana (tabela 1) zauważono, iż wraz ze wzrostem prawdopodobieństwa wartości przepływów maksymalnych malały, zarówno w przypadku II, jak i III poziomu uwilgotnienia zlewni. Największa wartość Q_{max} dla prawdopodobieństwa 0,5% wyniosła 11,61 $m^3 \cdot s^{-1}$ (II poziom uwilgotnienia) oraz 31,44 $m^3 \cdot s^{-1}$ (III poziom uwilgotnienia). W przy-

padku prawdopodobieństwa wynoszącego 20% oraz dla II poziomu uwilgotnienia zlewni odpływ wyniósł 0,35 $m^3 \cdot s^{-1}$, a dla III poziomu –8,77 $m^3 \cdot s^{-1}$. Natomiast dla prawdopodobieństwa 50% dla II poziomu uwilgotnienia nie wygenerowano odpływu, co związane jest z całkowitym wchłonięciem opadu efektywnego przez zlewnię (całość opadu jest retencjonowana w zlewni). Oznacza to, że retencja jest większa od opadu. Dla poziomu niekorzystnego (III) dla prawdopodobieństwa 50% Q_{max} wyniósł 8,48 $m^3 \cdot s^{-1}$.

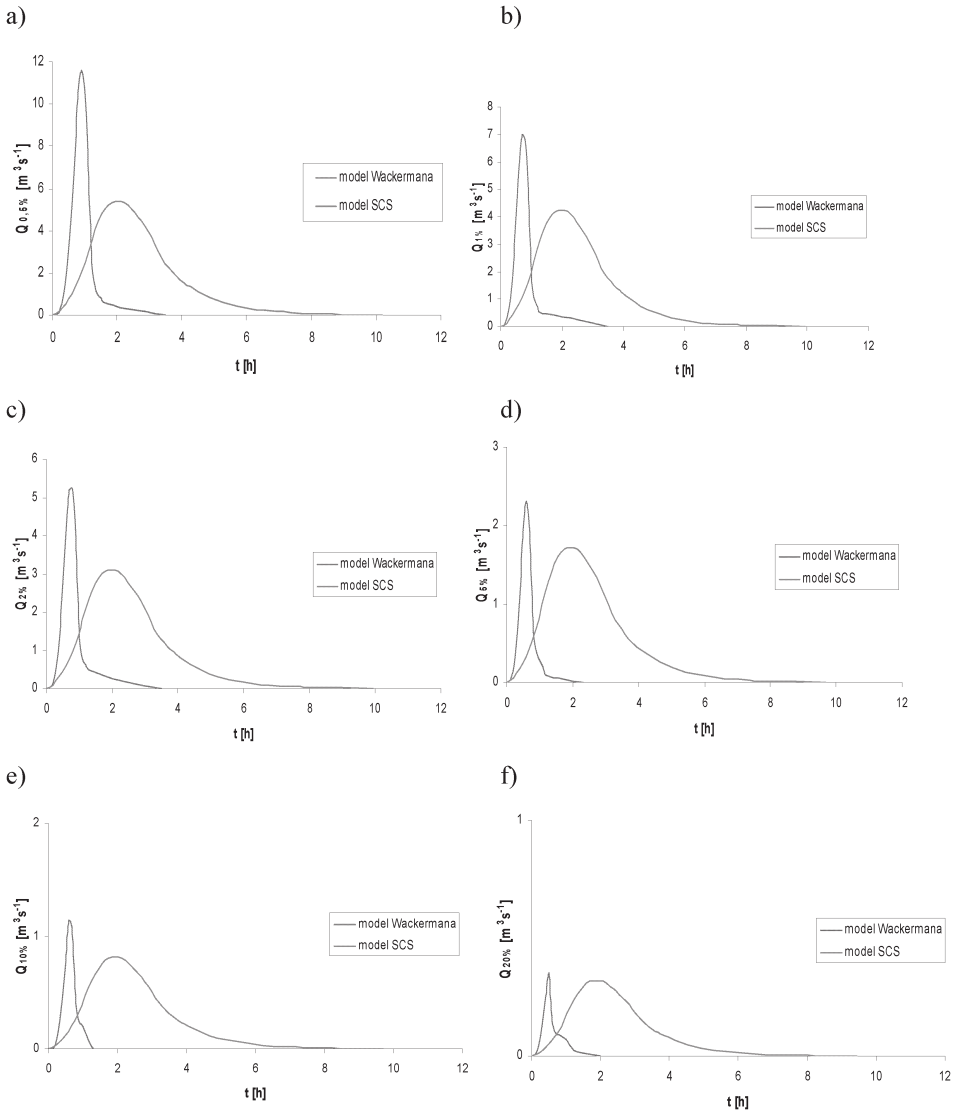
Tabela 1. Zestawienie wyników obliczeń przepływów maksymalnych dla modelu Wackermana i NRCS-UH

Table 1. The comparison of maximum flow's results for Wackerman and NRCS-UH models

Prawdopodobieństwo p [%]	A [km^2]	CN		Q_{max} [$m^3 s^{-1}$] model Wackermana			Q_{max} [$m^3 s^{-1}$] NRCS-UH		
		II	III	II	III	t_{pII}	t_{pIII}	II	III
0,5	7,95	72	86	11,61	31,44	2,04	1,45	5,39	23,21
1				5,5	27,5	1,99	1,45	4,25	19,85
2				4,82	23,05	1,99	1,45	3,11	16,63
5				2,31	15,91	1,94	1,45	1,72	12,08
10				1,54	12,94	1,94	1,45	0,81	8,63
20				0,35	8,77	1,89	1,45	0,32	6,15
50				-	8,48	1,69	1,45	-	3,01

Również w przypadku modelu NRCS-UH przepływy maksymalne dla poszczególnych prawdopodobieństw i dla II stopnia uwilgotnienia mają wartości niższe w stosunku do wartości dla III poziomu uwilgotnienia (Tabela 1). Przykładowo, dla prawdopodobieństwa 0,5% dla II poziomu uwilgotnienia przepływ maksymalny Q_{max}=5,39 $m^3 \cdot s^{-1}$ a dla III Q_{max}=23,21 $m^3 \cdot s^{-1}$, z kolei dla prawdopodobieństwa 20% dla II poziomu uwilgotnienia Q_{max}=0,32 $m^3 \cdot s^{-1}$ a dla III Q_{max}=6,15 $m^3 \cdot s^{-1}$. Wraz ze wzrostem prawdopodobieństwa wartości przepływów maksymalnych maleją, zarówno dla i III poziomu uwilgotnienia. W przypadku prawdopodobieństwa wystąpienia 50% i dla II poziomu uwilgotnienia, podobnie jak w modelu Wackermana odpływ nie występuje, co oznacza, że opad efektywny został całkowicie wchłonięty przez zlewnię.

Przeprowadzone obliczenia przepływów maksymalnych o określonym prawdopodobieństwie wystąpienia uzyskane z wykorzystaniem modelu Wackermana i NRCS-UH pozwoliły na porównanie ich wartości (rys. 1). Najbardziej zauważalną rozbieżnością jest kształt fali wezbraniowej. Dla modelu Wackermana otrzymano typowy hydrogram wezbrania charakteryzujący rzeki górskie: fala gwałtownie wzrasta i tak samo opada. Natomiast w przypadku modelu NRCS-UH rośnie mniej gwałtownie oraz opada bardzo powoli, co nie oddaje w pełni górskiego charakteru rzeki Sielski Potok.



Rysunek 1. Hydrogramy przepływów maksymalnych dla rzeki Sielski Potok dla II poziomu uwilgotnienia dla modelu Wackermana i NRCS-UH dla prawdopodobieństw: a) 0,5%; b) 1%; c) 2%; d) 5%; e) 10%; f) 20%
Figure 1. Maximum flow hydrographs for Sielski Potok river and for II stage of moisture in Wackerman and NRCS-UH models for probabilities: a) 0,5%; b) 1%; c) 2%; d) 5%; e) 10%; f) 20%

Widoczna jest także różnica w objętości fal pomiędzy modelami. Zauważono, że wraz ze wzrostem prawdopodobieństwa zmniejszają się różnice pomiędzy objętościami fal wezbraniowych. Zależność ta jest prawdziwa tylko dla II poziomu uwilgotnienia. Dla III poziomu różnice objętości poszczególnych przepływów maksymalnych określonych za pomocą obydwu modeli są zbliżone i wynoszą około 25% wielkości przepływów, w przypadku każdego prawdopodobieństwa wystąpienia. Na przykład, w metodzie Wackermana dla prawdopodobieństwa wystąpienia 0,5% Q_{max} wyniosło 31,44 $m^3 \cdot s^{-1}$ oraz 23,21 $m^3 \cdot s^{-1}$ w metodzie NRCS-UH, dla prawdopodobieństwa 20% przepływy osiągnęły wartość odpowiednio 8,77 $m^3 \cdot s^{-1}$ i 6,15 $m^3 \cdot s^{-1}$. W przypadku prawdopodobieństwa wystąpienia wynoszącego 50% wartości przepływów maksymalnych wyniosły: 8,48 $m^3 \cdot s^{-1}$, dla metody Wackermana oraz 3,01 $m^3 \cdot s^{-1}$ dla metody NRCS-UH. Zauważyć można również, że w przypadku obu modeli wraz ze wzrostem prawdopodobieństwa maleje objętość przepływów maksymalnych.

PODSUMOWANIE

Porównanie uzyskanych hydrogramów wezbrań wyznaczonych za pomocą modelu Wackermana i NRCS-UH wykazały różnice w objętościach przepływów maksymalnych. Najbardziej zauważalny jest różny w obu modelach kształt fali wezbraniowej. W przypadku modelu Wackermana otrzymano typowy hydrogram wezbrania charakteryzujący rzeki górskie, natomiast w przypadku modelu NRCS-UH fala wezbraniowa nie oddaje w pełni górskiego charakteru rzeki Sielski Potok. Wraz ze wzrostem prawdopodobieństwa dla II poziomu uwilgotnienia zmniejszały się różnice pomiędzy objętościami fal wezbraniowych. Dla III poziomu różnice objętości poszczególnych przepływów były podobne w przypadku każdego prawdopodobieństwa wystąpienia. W obydwu metodach wartości przepływów maksymalnych malały wraz ze wzrostem prawdopodobieństwa. W przypadku obu modeli dla prawdopodobieństwa 50% oraz dla II poziomu uwilgotnienia odpływ powierzchniowy nie występował.

Uwzględniając różnice w wielkości przepływów maksymalnych oraz kształcie fali wezbraniowej otrzymanych z wykorzystaniem obu modeli do symulacji hydrogramu wezbrania w przypadku niekontrolowanej zlewni rzeki górskiej celowym wydaje się zastosowanie modelu Wackermana, który lepiej oddawał charakter rzeki tego typu.

BIBLIOGRAFIA

Banasik K., Ignar S. 1984. *Wykorzystanie hydrogramu jednostkowego w projektowaniu małych zbiorników*, Konferencja Naukowo-Techniczna „Zbiorniki retencyjne dla rolnictwa", SGGW-AR, Warszawa.

Kupczyk E., Suligowski R. 1997. *Statystyczny opis struktury opadów atmosferycznych jako elementu wejścia do modeli hydrologicznych*, [w:] *Predykcja opadów i wezbrań o zadanym czasie powtarzalności*, U. Soczyńska (red), Wyd. Uniwersytetu Warszawskiego, Warszawa, 73.

Nowicka B., Wolska M. 2003. *Wpływ retencji zlewni na formowanie kulminacji wezbrań opadowych*, [w:] *Rola retencji zlewni w kształtowaniu wezbrań opadowych*, M. Gutry-Korycka, B. Nowicka, U. Soczyńska (red), Wyd. Uniwersytetu Warszawskiego, Warszawa, 107.

Ozga-Zielińska M., Brzeziński J. 1997. *Hydrologia stosowana*, Wyd. Nauk. PWN, Warszawa.

Lambor J., 1971, *Hydrologia inżynierska*, Arkady, Warszawa.

Soczyńska U., Gutry-Korycka M., Buza J. 2003. *Ocena zdolności retencyjnej zlewni*, [w:] *Rola retencji zlewni w kształtowaniu wezbrań opadowych*, M. Gutry-Korycka, B. Nowicka, U. Soczyńska (red), Wyd. Uniwersytetu Warszawskiego, Warszawa, 95-97.

Stachỳ J. (red), 1987, *Atlas hydrologiczny Polski*, t. I., Wyd. Geologiczne IMGW, Warszawa.

Wałęga A., Cupak A. 2011. *Informacja hydrologiczna na potrzeby określania stref zagrożenia powodziowego w dolinach rzecznych*, red. prof. Janusz Rak, Wyd. Muzeum Regionalnego im. Adama Fastnachta w Brzozowie, 101-120.

Dr inż. Agnieszka Cupak
e-mail: a.cupak@ur.krakow.pl

Dr inż. Andrzej Wałęga
e-mail: a.walega@ur.krakow.pl

Katedra Inżynierii Sanitarnej i Gospodarki Wodnej
Uniwersytet Rolniczy im.H.Kołłątaja
al. Mickiewicza 24/28
30-059 Kraków