



METODY STATYSTYCZNE

w analizach hydrologicznych
środkowej Polski

pod redakcją Pawła Jokiela



WYDAWNICTWO
UNIwersytetu
ŁÓDZKIEGO



METODY STATYSTYCZNE

w analizach hydrologicznych
środkowej Polski



WYDAWNICTWO
UNIwersytetu
ŁÓDZKIEGO

METODY STATYSTYCZNE

w analizach hydrologicznych
środkowej Polski

pod redakcją Pawła Jokiela

Paweł Jokieli – Uniwersytet Łódzki, Wydział Nauk Geograficznych
Katedra Hydrologii i Gospodarki Wodnej, 90-139 Łódź, ul. Narutowicza 88

RECENZENT

Urszula Somorowska

REDAKTOR WYDAWNICTWA UŁ

Katarzyna Gorzkowska

KOREKTA TECHNICZNA RYSUNKÓW

Adam Bartnik

SKŁAD I ŁAMANIE

AGENT PR

PROJEKT OKŁADKI

czartart.com: Izabela Surdykowska-Jurek

Zdjęcia wykorzystane na okładce: © Ivan Piven (Photoprince) – Fotolia.com

© Depositphotos.com/StevanZZ

W publikacji zostały zamieszczone rozdziały autorstwa: Adama Bartnika, Pawła Jokiela
Piotra Moniewskiego, Przemysława Tomalskiego, Edmunda Tomaszewskiego
Uniwersytet Łódzki, Wydział Nauk Geograficznych
Katedra Hydrologii i Gospodarki Wodnej, 90-139 Łódź, ul. Narutowicza 88

© Copyright by Uniwersytet Łódzki, Łódź 2015

Wydane przez Wydawnictwo Uniwersytetu Łódzkiego
Wydanie I. W.06914.15.0.K

Ark. wyd. 20,0; ark. druk. 18,375

ISBN 978-83-7969-670-3

e-ISBN 978-83-7969-671-0

Wydawnictwo Uniwersytetu Łódzkiego
90-131 Łódź, ul. Lindleya 8
www.wydawnictwo.uni.lodz.pl
e-mail: ksiegarnia@uni.lodz.pl
tel. (42) 665 58 63

Spis treści

Od redaktora (<i>Paweł Jokiel</i>)	9
1. Analiza chwilowych zmian przepływu w małej rzece miejskiej na przykładzie łódzkiej Sokołówki (<i>Adam Bartnik, Przemysław Tomalski</i>)	13
1.1. Wprowadzenie	13
1.2. Obszar badań i materiał źródłowy	14
1.3. Chwilowe zmiany natężenia przepływu	16
1.4. Maksymalne wzrosty i spadki natężenia przepływu	19
1.5. Chwilowe zmiany natężenia przepływu w trakcie wezbrań	21
1.6. Podsumowanie	25
2. Analiza sezonowej zmienności wybranych cech fizykochemicznych wody małych cieków odwadniających obszary o różnym stopniu antropopresji (<i>Adam Bartnik, Piotr Moniewski</i>)	27
2.1. Wprowadzenie	27
2.2. Materiał analityczny	30
2.3. Wskaźniki fizykochemiczne	33
2.4. Sezonowość cech fizykochemicznych	40
2.5. Wnioski	45
3. Analiza faz i form odpływu ze zlewni rzecznej na przykładzie Dzierżąznej (<i>Paweł Jokiel, Edmund Tomaszewski</i>)	49
3.1. Wprowadzenie	49
3.2. Obszar badań	50
3.3. Odpływy charakterystyczne	51
3.4. Roczne nadwyżki i niedobory odpływu	55
3.5. Wezbrania i niżówki	57
3.6. Formy odpływu	60
3.7. Powiązania i korelacje	64
4. Analiza trendów wieloletnich na przykładzie odpływów ekstremalnych ze zlewni środkowej Polski (<i>Paweł Jokiel</i>)	69
4.1. Wprowadzenie	69
4.2. Odpływy charakterystyczne w wieloleciu	70
4.3. Zmienność ekstremalnych odpływów miesięcznych	74
4.4. Trendy miesięcznych odpływów ekstremalnych	78

5. Analiza przepływów maksymalnych i miar pochodnych na przykładzie rzek Nizy Polskiego (Adam Bartnik, Paweł Jokiel)	87
5.1. Wprowadzenie	87
5.2. Podstawy analizy i materiał badawczy	89
5.3. Obwiednia przepływów maksymalnych	94
5.4. Odpięty jednostkowe	98
5.5. Indeksy K (François-Rodiera)	101
5.6. Prawdopodobieństwo wystąpienia skrajnie niekorzystnej sytuacji powodziowej	102
5.7. Indeksy wysokiej wody IWW	104
6. Analiza czasowej i przestrzennej zmienności niedoborów odpływu niżówkowego w środkowej Polsce (Edmund Tomaszewski)	107
6.1. Wprowadzenie	107
6.2. Materiał badawczy	109
6.3. Zmienność wieloletnia	111
6.4. Struktura sezonowa	114
6.5. Pora koncentracji suszy hydrologicznej	118
7. Analiza ekstremalnych stanów wód podziemnych na przykładzie płytkich poziomów wodonośnych środkowej Polski (Przemysław Tomalski)	129
7.1. Wprowadzenie	129
7.2. Obszar badań i materiał badawczy	130
7.3. Rozkłady prawdopodobieństwa ekstremów rocznych	133
7.4. Współczynniki autokorelacji ekstremów rocznych	142
7.5. Kwantyle prawdopodobieństwa ekstremów rocznych	146
7.6. Wieloletnia zmienność ekstremalnych stanów wód podziemnych	148
7.7. Podsumowanie	151
8. Analiza wydajności źródeł na przykładzie dwóch obiektów z okolic Łodzi (Piotr Moniewski)	153
8.1. Wprowadzenie	153
8.2. Pomiary wydajności i ich uzupełnianie	154
8.3. Wydajność źródeł	156
8.4. Sezonowa zmienność wydajności	158
8.5. Krzywe wysychania	159
8.6. Bezładność wydajności	162
8.7. Synchroniczność wydajności	164
8.8. Rola źródeł w zasilaniu cieków	168
8.9. Podsumowanie	171
9. Wieloaspektowa analiza statystyczna hydrogramu przepływu rzeki na przykładzie Pilicy w Przedborzu (Adam Bartnik, Paweł Jokiel)	173
9.1. Wprowadzenie	173
9.2. Materiał analityczny	175
9.3. Roczny hydrogram przepływu	176
9.4. Funkcje rozkładu przepływów dobowych i hydrogramy ich prawdopodobieństwa	181
9.5. Sezonowość przepływu	187
9.6. Zmiany i zmienność wieloletnia przepływu	191

10. Identyfikacja i analiza sezonów hydrologicznych na przykładzie dwóch rzek z obszaru środkowej Polski (Paweł Jokiel, Przemysław Tomalski)	201
10.1. Wprowadzenie	201
10.2. Materiał hydrometryczny i przygotowanie danych	202
10.3. Identyfikacja sezonów hydrologicznych	204
10.4. Sezony hydrologiczne w Nerze i Prośnie	208
10.5. Porównanie sezonów hydrologicznych i okresów hydrologicznych	211
10.6. Podsumowanie	213
11. Metody, formuły i wzory obliczeniowe zastosowane w pracy (Przemysław Tomalski, Edmund Tomaszewski)	215
11.1. Zagadnienia statystyczne	215
11.1.A. Przygotowanie szeregów pomiarowych do analiz statystycznych	216
11.1.B. Miary średnie	218
11.1.C. Miary rozrzutu i zmienności	220
11.1.D. Miary skośności	225
11.1.E. Miary koncentracji	226
11.1.F. Miary sezonowości	227
11.1.G. Współzmiennność	230
11.1.H. Regresja	234
11.1.I. Rozkłady statystyczne	238
11.1.J. Testy statystyczne	245
11.1.K. Analizy wielowymiarowe	251
11.2. Zagadnienia hydrologiczne	253
11.2.A. Charakterystyki pomiarowe	254
11.2.B. Miary odpływu	256
11.2.C. Przepływy i odpływy charakterystyczne	257
11.2.D. Formy odpływu	259
11.2.E. Fazy odpływu	265
11.2.F. Charakterystyki środowiskowe	270
Bibliografia	273
Wykaz symboli i oznaczeń	283
Spis tabel i rysunków	289

Od redaktora

...potwierdzenie hipotezy naukowej jest zaledwie nieudaną próbą jej obalenia.

Carl Popper

Ilość informacji, jaką zmuszeni jesteśmy absorbować i analizować we współczesnym procesie poznawczym stale rośnie. Wskutek tego, w czasie poznawania otaczającej nas rzeczywistości coraz bardziej niezbędne stają się różnego rodzaju narzędzia, które pomagają nam te informacje poprawnie zebrać, uporządkować i przeanalizować, a później – na drodze logicznego wnioskowania indukcyjnego czy dedukcyjnego – uchwycić prawidłowości lub zbudować wiarygodne modele, a na ich podstawie wyciągnąć pożyteczne wnioski. Jednym z takich narzędzi jest niewątpliwie *statystyka*, która z jednej strony umożliwia pełne wykorzystanie naszych zdolności twórczych w celu odkrywania nowych prawidłowości i identyfikacji różnych powiązań, lecz z drugiej – nie pozwala na czcze i bezowocne formułowanie teorii oraz hipotez nieprawdziwych i nieweryfikowalnych. Nauka ta bazuje bowiem na planowym, rzetelnym i optymalnym opracowaniu danych metodami wykorzystującymi aparat logiczny i matematyczny, a także na celowym testowaniu postawionych hipotez i wykrywaniu różnych możliwych alternatyw (Rao 1994). Mimo wielu ograniczeń i zagrożeń, jakie niesie w sobie wnioskowanie statystyczne, których wyrazem mogą być żartobliwe motta poprzedzające rozdziały prezentowanej monografii, nie ma wątpliwości, że wyniki analiz statystycznych są bardzo pożyteczne w odkrywaniu i wyjaśnianiu zjawisk oraz procesów zachodzących w środowisku.

W tytule poniższej książki pojawił się termin *środkowa Polska*. Jest to pojęcie nieostre i właściwie nie ma swego odpowiednika w powszechnie uznanych regionalizacjach i podziałach terytorialnych naszego kraju. Zakreślony na potrzeby tej monografii obszar badań nie jest w ścisłym znaczeniu tego słowa regionem fizycznogeograficznym czy krajobrazowym. Pojęcie to ma charakter czysto umowny i odnosi się do terytorium znajdującego się w centralnej Polsce, na którym przenikają się krajobrazy wyżyn, nizin i pojezierzy. Równocześnie – z uwagi na układ, sposób wykształcenia i wykorzystania sieci rzecznej oraz

zasoby wodne i elementy bilansu wodnego – tak zarysowany obszar można traktować jako swoiste zaplecze wodne aglomeracji miejskiej Łodzi. Już dziś wiadomo, że dostęp do niewielkich zasobów wodnych tego obszaru jest bardzo ograniczony i, niestety, będzie stale malał. Coraz trudniejsze i bardziej złożone staną się zatem nie tylko prognozy dalszych przemian struktury naturalnego bilansu wodnego, lecz pojawią się też istotne problemy przy zestawianiu różnoskalowych bilansów wodnogospodarczych, w pozyskiwaniu danych hydrologicznych dla projektów hydrotechnicznych, w ochronie przeciwpowodziowej i – co szczególnie ważne dla terenów środkowej Polski – w zapobieganiu skutkom susz hydrologicznych oraz zarządzaniu gospodarką wodną (Jokiel 2004). Wydaje się więc, że ze względów poznawczych, dydaktycznych i praktycznych przedstawienie przykładów różnorodnych analiz statystycznych, poprawnie wykonanych w odniesieniu do różnych grup obiektów, procesów, zmiennych środowiskowych i hydrologicznych tego regionu, może być użyteczne oraz interesujące poznawczo.

Książka, którą oddajemy do rąk Czytelnika, nie jest podręcznikiem do statystyki, gdyż tego rodzaju opracowań, i to znakomitych, napisano już bardzo wiele, a ich autorzy jawią się dużo lepszymi fachowcami w tej dziedzinie niż członkowie zespołu redakcyjnego. Z tego względu napisanie kolejnego podręcznika wydawało się nam niecelowe i mało interesujące. Z oczywistych powodów korzystaliśmy jednak z wielu różnego rodzaju prac i podręczników metodycznych, choćby po to, by wskazać Czytelnikowi alternatywne, a także – co istotne – poszerzające wiedzę źródła informacji metodycznej.

Niniejsze opracowanie nie jest również monografią hydrologiczną, której celem byłaby prezentacja szeroko pojętych stosunków wodnych środkowej Polski, choć w poszczególnych rozdziałach zamieściliśmy szereg ważnych merytorycznie informacji geograficznych i hydrologicznych, zaczerpniętych z licznie cytowanej literatury problemowej oraz regionalnej. Z jednej strony pozwoliło to na poprawne zdefiniowanie i objaśnienie zmiennych środowiskowych poddanych analizom statystycznym. Z drugiej natomiast – umożliwiło prawidłową i możliwie szeroką interpretację wyników analiz statystycznych, jak też poszukiwanie cennych poznawczo powiązań i prawidłowości.

Autorami poszczególnych rozdziałów są doświadczeni hydrologi i geografowie Wydziału Nauk Geograficznych Uniwersytetu Łódzkiego. Zaprezentowane przez nich przykłady statystycznych analiz różnych problemów hydrologicznych i środowiskowych zostały już wcześniej zweryfikowane i najczęściej zaprezentowane na forum naukowym w postaci referatów, artykułów i notatek. Zasięg tego rodzaju publikacji był jednak niewielki i ograniczony przeważnie do środowiska naukowego. Zatem zebranie tych doświadczeń przy jednoczesnym rozszerzeniu zawartych w nich wniosków merytorycznych oraz złożenie całości do postaci zwartej monografii, przeznaczonej dla szerszego odbiorcy, jest w mojej opinii celowe i uzasadnione.

Czego zatem Czytelnik może oczekiwać, biorąc do rąk prezentowaną monografię? Przede wszystkim przykładów rzetelnych, celowych i wielopłaszczyznowych interpretacji wyników podstawowych analiz statystycznych, przeprowadzonych w odniesieniu do procesów i zjawisk hydrologicznych zachodzących w środkowej Polsce w różnych skalach przestrzennych i czasowych. Należy podkreślić, że autorzy rozdziałów szczególnie duży nacisk położyli na aspekt interpretacyjny. Zauważyliśmy bowiem, że w statystycznych analizach zmiennych środowiskowych wiele uwagi poświęca się poprawności metodycznej i obliczeniowej modeli oraz procedur statystycznych (co nie jest oczywiście błędem), ale jednocześnie można w nich znaleźć zbyt mało wieloaspektowej oceny uzyskanych statystyk i modeli statystycznych. W skrajnych przypadkach stwarza to wrażenie, że nierzadko skomplikowane analizy statystyczne są celem samym w sobie, natomiast uzyskane wyniki są zinterpretowane nie tyle błędnie, ile mało dociekliwie.

Dla kogo zatem przeznaczona jest ta monografia? Przede wszystkim dla Czytelników mających już podstawową wiedzę z zakresu statystyki matematycznej i hydrologii oraz chcących ją dalej pogłębiać. Będzie ona szczególnie użyteczna dla badaczy, którzy pragną nie tylko poznać nowe zastosowania znanych już sobie metod, lecz dogłębnie i wieloaspektowo interpretować różne statystyki i modele statystyczne. Od dawna wiadomo, że statystyki najlepiej uczyć się na przykładach, a zatem zaproponowany układ monografii wydaje się poprawny i celowy, choć nie najłatwiejszy do studiowania. Ujmując rzecz praktycznie, książka ta może być szczególnie użyteczna dla licencjatów, magistrantów i doktorantów prowadzących badania środowiska (nie tylko wodnego) metodami statystycznymi. Może być też przydatna dla wszystkich, dla których obliczenie średniej, współczynnika korelacji czy określenie rozkładu zmiennej losowej jest dopiero początkiem dociekań naukowych.

Zaproponowany układ treści jest dość specyficzny. Kluczową rolę pełni w nim rozdział 11. Zawiera on bowiem definicje i informacje o różnych, często trudnych do zinterpretowania zmiennych, które zostały obliczone i których statystyki przeanalizowano we wcześniejszych rozdziałach. Zawiera on też krótkie informacje, podstawowe wzory i formuły niezbędne do obliczenia oraz prawidłowego zinterpretowania wykorzystanych w poszczególnych rozdziałach pracy statystyk, metod i procedur obliczeniowych. Integralną i ważną częścią tego rozdziału są odwołania do literatury, które wskazują Czytelnikowi nie tylko źródła informacji wykorzystane przez autorów, lecz także opracowania szczególnie użyteczne dla poszerzenia wiedzy metodycznej. Pozostałe 10 rozdziałów zawiera przykłady analiz statystycznych wykonanych w różnych skalach przestrzennych i czasowych, dotyczące różnych i – zdaniem autorów – ważnych problemów hydrologicznych. Istotnym elementem każdego rozdziału są odsyłacze do rozdziału ostatniego. Kierują one Czytelnika do stosownych definicji i formuł statystycznych i hydrologicznych, zapobiegając tym samym powtarzaniu informacji metodycznej w kolejnych rozdziałach.

Mimo że kolejne rozdziały prezentowanej monografii poprzedziliśmy żartobliwie i niekiedy przewrotnie brzmiącymi mottami dotyczącymi statystyki, to wszyscy jesteśmy zwolennikami szerokiego, aczkolwiek mądrego i racjonalnego wykorzystania metod statystycznych w hydrologii i naukach przyrodniczych. Zawsze musi temu jednak towarzyszyć myśl Irwina Brossa: „Metody statystyczne nie powiększają posiadanych informacji. Pozwalają jedynie na to, żeby te informacje maksymalnie wykorzystać”.

Zapraszam do lektury.

Paweł Jokiel

1.

Analiza chwilowych zmian przepływu w małej rzece miejskiej na przykładzie łódzkiej Sokołówki

Adam Bartnik, Przemysław Tomalski

*Komputery są doskonałe do trwonienia czasu,
który bez nich o wiele trudniej byłoby zmarnować.*

Clifford Stoll

1.1. Wprowadzenie

Współczesne badania hydrologiczne, zwłaszcza te dotyczące rzek, wymagają zwykle długich i wiarygodnych ciągów pomiarowych. W przypadku natężenia przepływu najczęściej wykorzystywane są dane o kroku dobowym, co jest skutkiem obliczania ich nie w sposób bezpośredni, lecz za pomocą ustalonej wcześniej relacji ze stanami wody obserwowanymi z taką częstotliwością (Kędra 2008) – por. podrozdz. 11.2.A. Częstsze próbkowanie można uzyskać, stosując limnigrafy lub inne urządzenia rejestrujące zjawisko w sposób ciągły. W tym przypadku należy jednak mieć świadomość błędów popełnianych przy wykorzystaniu związku: stan wody – natężenie przepływu. Wynikają one przede wszystkim z przyjmowanego, lecz nie zawsze prawdziwego założenia, że w krótkim przedziale czasowym stan wody zależy tylko od natężenia przepływu (w praktyce bardziej użyteczne jest odwrócenie tej relacji). Na przykład w czasie przejścia fali wezbraniowej mamy do czynienia z różnymi nachyleniami zwierciadła wody przy takim samym stanie. Skutkuje to pojawieniem się zjawiska histerezy krzywej natężenia przepływu i zachwianiem relacji: stan wody – przepływ (Byczkowski 1996). Z tego powodu szeregi stanów wody i przepływów o kroku krótszym niż

dobowy są rzadko analizowane – a szkoda, gdyż w przypadku zlewni miejskich, gdzie szybkość reakcji na zasilanie systemu cieków jest bardzo duża, badania takie mogą dostarczyć wielu ciekawych informacji hydrologicznych i z zakresu gospodarki wodnej.

W ostatnich latach pojawiły się urządzenia umożliwiające ciągłe pomiary prędkości i głębokości płynącej wody, a zatem i natężenia przepływu. Bazują one na efekcie Dopplera i są coraz częściej używane do ciągłego monitoringu ilościowego w zlewniach eksperymentalnych. Ich zastosowanie stwarza możliwość opisu krótkotrwałych zmian natężenia przepływu o kroku krótszym niż dobowy. Zmiany takie mogą być naturalne i wynikać ze zmienności zasilania opadowego, roztopowego, dopływu wód podziemnych czy nawet krótkoterminowych zmian lokalnego parowania. Ale mogą też być antropogeniczne i mieć swój pełny wymiar w rzekach odbierających zrzuty z oczyszczalni ścieków, z odwadniania kopalń, czy też wynikać z gospodarki wodnej na sztucznych zbiornikach przepływowych o różnej pojemności i funkcji (Thirriot 1993). W tym rozdziale przedstawimy kilka prób celowej analizy statystycznej szeregów czasowych oraz różnych miar i charakterystyk opisujących krótkoterminowe zmiany natężenia przepływu, uzyskanych za pomocą urządzeń zamontowanych w korycie małej rzeki miejskiej z obszaru Łodzi. Szczególną uwagę zwrócimy na wnioski metodyczne i aplikacyjne płynące z tego rodzaju badań, a także wskażemy kilka kierunków i możliwości interpretacyjnych.

1.2. Obszar badań i materiał źródłowy

Od roku 2006 Katedra Hydrologii i Gospodarki Wodnej Uniwersytetu Łódzkiego prowadzi badania w zlewni Sokołówki będącej lewym dopływem Bzury. Obszar ten znajduje się w północnej części Łodzi i niemal w całości zawiera się w granicach administracyjnych miasta (rys. 1.1). Zlewnia Sokołówki jest w znacznym stopniu zurbanizowana – w jej górnej części znajduje się kilka osiedli domów jednorodzinnych, zaś środkową zajmują tereny przemysłowe (Bartnik i in. 2008). Początkowy fragment koryta Sokołówki jest przykryty betonowymi płytami i włączony w system kanalizacji deszczowej miasta. Obszary zabudowane zajmują ogółem 47% powierzchni zlewni, lasy i parki – 19%, a użytki rolne, skupione na obrzeżach miasta i w dolnej części zlewni – 23%. Wśród osadów budujących górną i środkową część zlewni dominują gliny zwałowe, natomiast w dolnej przeważają piaski wodnolodowcowe. Aż 71% utworów powierzchniowych charakteryzuje się bardzo dobrymi parametrami filtracyjnymi. Należy jednak zaznaczyć, że na obszarze miasta serie osadowe są często przesłonięte przez warstwę „narzutu antropogenicznego” (gruz, szlaka, ziemia z wykopów itp.), ograniczającego ich naturalną wodoprzepuszczalność.

The map shows the study area with four main locations labeled: Sokółów, Brzoza, Lewa, and Folwarczna. A legend on the left lists 8 symbols: 1 (light gray square), 2 (dark gray square), 3 (black square), 4 (white square), 5 (dashed line), 6 (solid line), 7 (dotted line), and 8 (black dot). A scale bar at the top indicates 0, 1, and 2 km. A north arrow is located at the bottom left. An inset map at the top right shows the location of the study area within the Lodz region, with labels for Pątnów, Dąbrowa, Sieradz, Złotów, Łódź, and Piotrków Trybunalski.

Objaśnienia: 1 – lasy i parki; 2 – obszary przemysłowe; 3 – obszary o zabudowie mieszkalnej; 4 – nieużytki, łąki i pola uprawne; 5 – dział wodny; 6 – rzeki; 7 – linie kolejowe; 8 – przekroje pomiarowe.

* Tam, gdzie nie podano źródła, rysunki i tabele zostały przygotowane przez autorów rozdziału.