

Ekonometria przestrzenna

**Metody i modele
analizy danych przestrzennych**

Redakcja naukowa
Bogdan Suchecki

Wydawnictwo C.H. Beck 

Ekonometria przestrzenna

Autorzy:

Elżbieta Antczak rozdziały 3*, 5*, 6*, 7*

Karolina Lewandowska-Gwarda rozdziały 1*, 2*, 7*

Alicja Olejnik rozdziały 1*, 4*, 9*

Jadwiga Suchecka rozdział 3*

Bogdan Suchecki rozdziały 1*, 2*, 4*, 5*, 6*, 8, 9*, 10

* współautorstwo

Ekonometria przestrzenna

**Metody i modele
analizy danych przestrzennych**

**Redakcja naukowa
Bogdan Suchecki**



**WYDAWNICTWO C.H. BECK
WARSZAWA 2010**

Wydawca: Dorota Ostrowska-Furmanek
Redakcja merytoryczna: Urszula Cielniak
Recenzent: prof. zw. dr hab. Andrzej St. Barczak
Projekt okładki i stron tytułowych: Maryna Wiśniewska
Ilustracja na okładce: © Mark Evans/iStockphoto.com

Seria: Metody ilościowe

Złożono programem T_EX



© Wydawnictwo C.H. Beck 2010

Wydawnictwo C.H. Beck Sp. z o.o.
ul. Bonifraterska 17, 00-203 Warszawa

Skład i łamanie: Wydawnictwo C.H. Beck
Druk i oprawa: Poznańskie Zakłady Graficzne

ISBN 978-83-255-1122-7

Spis treści

Wstęp	
<i>(Bogdan Suchecki)</i>	8
Rozdział 1. Wprowadzenie do przestrzennych analiz ekonomicznych	
<i>(Bogdan Suchecki, Karolina Lewandowska-Gwarda, Alicja Olejnik)</i>	16
1.1. Rozwój metodologii i zastosowań ekonometrii przestrzennej	16
1.2. Obserwacje i prawidłowości w badaniach przestrzennych	23
1.3. Interakcje przestrzenne: sąsiedztwo i odległość	26
1.4. Nota bibliograficzna	36
Rozdział 2. Klasyfikacja, wizualizacja i grupowanie danych przestrzennych	
<i>(Bogdan Suchecki, Karolina Lewandowska-Gwarda)</i>	37
2.1. Klasyfikacja danych przestrzennych	37
2.2. Źródła informacji przestrzennych	39
2.2.1. Portale tematyczne	40
2.2.2. Bazy danych statystycznych	42
2.2.3. Inne bazy danych	45
2.3. Wizualizacja danych przestrzennych	45
2.3.1. Mapy	46
2.3.2. Trellisy	54
2.4. Podstawy grupowania i klasyfikacji w badaniach przestrzennych	56
Rozdział 3. Elementy geostatystyki i metody analizy przestrzennych danych punktowych	
<i>(Jadwiga Suchecka, Elżbieta Antczak)</i>	70
3.1. Wprowadzenie do statystyki przestrzennej	70
3.2. Podstawowe pojęcia i metody geostatystyki	75
3.3. Metody interpolacji danych geostatystycznych	85
3.4. Analiza przestrzennych danych punktowych	90
Rozdział 4. Miary i testy statystyczne w eksploracyjnej analizie danych przestrzennych	
<i>(Bogdan Suchecki, Alicja Olejnik)</i>	100
4.1. Wprowadzenie	100
4.2. Heterogeniczność i autokorelacja przestrzenna	102
4.3. Macierze wag	105
4.4. Testowanie globalnej autokorelacji przestrzennej	107
4.5. Miary lokalnej autokorelacji przestrzennej	120
4.5.1. Statystyki LISA	123

4.5.2. Lokalne statystyki autokorelacji przestrzennej Getisa i Orda	126
Rozdział 5. Koncentracja i specjalizacja w przestrzennych analizach ekonomicznych	
<i>(Bogdan Suchecki, Elżbieta Antczak)</i>	129
5.1. Własności idealnego miernika koncentracji przestrzennej	129
5.2. Krzywa Lorenza i indeks Giniego dla danych przestrzennych	132
5.3. Inne mierniki koncentracji przestrzennej	143
5.4. Indeksy specjalizacji regionalnej	152
5.5. Interpretacje i zastosowania indeksów koncentracji i specjalizacji	154
Rozdział 6. Analizy strukturalno-geograficzne	
<i>(Bogdan Suchecki, Elżbieta Antczak)</i>	162
6.1. Klasyyczna metoda przesunięć udziałów (SSA)	163
6.2. Modele stochastyczne regresji ważonej SSANOVA	168
6.3. Dynamizacja analizy i modele panelowe przesunięć udziałów	179
6.3.1. Metoda zmiennych wag Barffa–Knighta	180
6.3.2. Metoda zmian konkurencyjności Estebana-Marquillasa	183
6.3.3. Panelowe modele SSANOVA	185
6.4. Przestrzenna metoda przesunięć udziałów (SSSA)	194
Rozdział 7. Nowa ekonomia geograficzna i modele specjalne	
<i>(Karolina Lewandowska-Gwarda, Elżbieta Antczak)</i>	202
7.1. Wprowadzenie	202
7.2. Modele przyczynowo-skutkowe nowej ekonomii geograficznej	204
7.3. Modele trendu powierzchniowego	214
7.4. Modele dyfuzji przestrzennej	220
7.5. Modele grawitacji, ciężenia i potencjału	226
7.5.1. Modele grawitacji i ciężenia	226
7.5.2. Modele potencjału	230
Rozdział 8. Modele regresji przestrzennej	
<i>(Bogdan Suchecki)</i>	237
8.1. Etapy konstrukcji ekonometrycznych modeli przestrzennych	237
8.2. Wybór macierzy odległości i konstrukcja macierzy wag	238
8.3. Wybór postaci funkcyjnej struktury interakcji przestrzennych	241
8.4. Budowa, własności i klasyfikacja jednorównaniowych modeli regresji przestrzennej	246
8.4.1. SAR – modele autoregresji przestrzennej	248
8.4.2. Modele z autokorelacją przestrzenną składnika losowego	250
8.4.3. SCM – modele z przestrzenną filtracją zmiennych objaśniających	251
8.4.4. Modele mieszane	252
8.5. Heterogeniczność przestrzenna w modelach ekonometrycznych	255
8.5.1. Modele z heteroskedastycznością przestrzenną składnika losowego	256
8.5.2. Niestabilność parametrów w modelach regresji przestrzennej	258
Rozdział 9. Estymacja modeli regresji przestrzennej	
<i>(Bogdan Suchecki, Alicja Olejnik)</i>	267
9.1. Uogólniona metoda najmniejszych kwadratów	268
9.2. Metoda największej wiarygodności	272
9.3. Uogólniona metoda momentów (UMM/GMM)	281
9.4. Przestrzennie uogólniona podwójna metoda najmniejszych kwadratów	285

Rozdział 10. Weryfikacja statystyczna i zastosowania modeli regresji przestrzennej	
<i>(Bogdan Suchecki)</i>	291
10.1. Testy i problemy weryfikacji statystycznej modeli z przestrzenią autoregresją lub autokorelacją	293
10.2. Strategie wyboru modelu regresji przestrzennej	299
10.3. Testowanie heterogeniczności w modelach regresji przestrzennej	306
10.4. Testowanie modelu w warunkach jednoczesnego występowania autokorelacji i heterogeniczności przestrzennej	310
10.4.1. Testowanie autokorelacji przestrzennej w obecności heteroskedastyczności	311
10.4.2. Testowanie heteroskedastyczności w obecności autokorelacji przestrzennej	314
10.4.3. Testowanie niestabilności parametrów w obecności zależności przestrzennych	315
10.5. Przykłady testowania i zastosowania modeli regresji przestrzennej	318
Zakończenie	333
Bibliografia	337
Indeks rzeczowy	353

Wstęp

Jeden z ważniejszych kierunków rozwoju współczesnej ekonomii i ekonometrii jest wyznaczany przez analizy przestrzenne i przestrzenno-czasowe. Myślenie kategoriami przestrzennymi oraz czasowo-przestrzennymi w teorii i praktyce staje się zjawiskiem coraz bardziej powszechnym, oznaczając bardziej wszechstronne i nowoczesne podejście do analiz teoretycznych i empirycznych złożonych, wzajemnie współzależnych zjawisk. Nowymi narzędziami tego typu badań stają się metody i modele **ekonometrii przestrzennej**.

Zasadniczym celem książki jest prezentacja problemów konstrukcji, estymacji i zastosowań takich modeli, które mogą opisywać i prognozować zjawiska przestrzenne oraz przestrzenno-czasowe, tzn. zmiany zachodzące pod wpływem wielu czynników w zachowaniu, działalności i funkcjonowaniu lub kształtowaniu się **obiektów przestrzennych** (kraje, regiony, województwa, powiaty). Z uwagi na to, że przestrzenne i przestrzenno-czasowe dane statystyczne są bardziej skomplikowane w swojej strukturze niż szeregi czasowe, nie można analizować ich za pomocą klasycznych metod ilościowych.

Ekonometria przestrzenna znajduje coraz szersze zastosowania w badaniach ekonomicznych. Chociaż na świecie ta dziedzina wiedzy rozwija się dynamicznie od połowy lat siedemdziesiątych XX w., a publikacje z tego zakresu są coraz liczniejsze, to w Polsce, oprócz tłumaczeń pionierskich prac Klaassena, Paelincka i Wagenaara [1982], Paelincka i Klaassena [1983] oraz niewielu artykułów w czasopismach i referatów na konferencjach naukowych, ukazały się jedynie dwie publikacje książkowe dotyczące tej problematyki. Pierwszą z nich była *Ekonometria przestrzenna* pod redakcją A. Zeliasia wydana w 1991 r. Drugą zaś książka K. Kopczewskiej *Ekonometria i statystyka przestrzenna z wykorzystaniem programu R CRAN* wydana w 2005 r.

Niniejsza książka zaplanowana została jako pierwszy tom obszerniejszej, dwutomowej monografii o charakterze podręcznikowym. Całość pracy zawiera szczegółowy wykład współczesnych metod i modeli ekonometrycznych stosowanych do analiz i modelowania zjawisk ekonomicznych na podstawie danych przestrzennych i przestrzenno-czasowych. Szczególny nacisk położony jest na opisanie technik budowy modeli oraz zaprezentowanie kierunków najnowszych badań z tego zakresu. Jednocześnie książka ma walor praktyczny ze względu na

prezentacje przykładów zastosowań proponowanych metod, które są wynikiem własnych analiz bądź zostały zaczerpnięte z literatury światowej.

Prezentowane po raz pierwszy w Polsce w tak szerokim zakresie, nowoczesne metody i modele ekonometrii przestrzennej mają dużą wartość, zarówno z poznawczo-naukowego punktu widzenia, jak i dla zastosowań praktycznych, dając ekonomistom możliwość powiększenia zbioru stosowanych narzędzi badawczych w empirycznych analizach ekonomicznych potrzebnych przy podejmowaniu decyzji w odpowiednich instytucjach szczebla centralnego i lokalnego. Ze względu na charakter podręcznikowy, publikacja będzie z pewnością pomocna w unowocześnieniu programów nauczania w szkołach wyższych na wszystkich kierunkach ekonomicznych i zarządzania, a w szczególności na: gospodarce przestrzennej, ekonomii, informatyce i ekonometrii, logistyce oraz zarządzaniu.

Książka składa się ze wstępu, dziesięciu rozdziałów, zakończenia i bibliografii. **Rozdział pierwszy** (*Wprowadzenie do analiz przestrzennych*) stanowi wprowadzenie do tematyki szeroko rozumianych analiz przestrzennych i przestrzenno-czasowych.

W pierwszym podrozdziale przedstawiony jest zarys historyczny i kierunki rozwoju ekonometrii przestrzennej. Prekursorem i projektodawcą nazwy „ekonometria przestrzenna” był Jean Henri Paul Paelinck, który jako pierwszy podkreślił znaczenie przestrzennego modelowania zmiennych ekonomicznych [Hordijk, Paelinck, 1976]. Paelinck zwrócił uwagę na fakt, iż poszczególne jednostki przestrzenne podlegają wpływom innych jednostek oraz zależą od zachodzących tam zmian ekonomicznych i politycznych. Uwzględnienie więc aspektów przestrzennych w modelowaniu ekonometrycznym umożliwia uzyskanie dodatkowych informacji na temat systemów ekonomicznych [Paelinck, Klaassen, 1979]. Łącząc metody ekonometrii, ekonomii oraz geografii, Paelinck zapoczątkował rozwój nowej dziedziny wiedzy – ekonometrii przestrzennej.

W latach osiemdziesiątych XX w. zdefiniowano ekonometrię przestrzenną jako naukę, której celem jest wyjaśnienie oraz opis zjawisk i procesów gospodarczych mających aspekt przestrzenny za pomocą metod ekonometrycznych. Zadaniem tej dziedziny nauk stało się wprowadzenie efektów przestrzennych do modeli ekonometrycznych, ich estymacja oraz prognozowanie przestrzenne [Anselin, 1988].

Z biegiem czasu zakres badań ekonometrii przestrzennej bardzo się poszerzył. Zwrócono uwagę na możliwość i konieczność testowania niestacjonarności i kointegracji danych przestrzenno-czasowych [Baltagi, 2003]. Obszar zastosowań metod ekonometrii przestrzennej jest bardzo szeroki, związany z najnowszymi kierunkami badań ekonomicznych (np. rynku pracy, wzrostu gospodarczego, konwergencji regionalnej i in.).

W podrozdziale 1.2 zdefiniowano pojęcia kwantyfikacji oraz porównywalności w przestrzeni. Omówione są przykłady regularnych i nieregularnych reprezentacji przestrzennych (punkty, obszary geograficzne i administracyjne). Dyskutowane są

także problemy nieregularności struktury danych przestrzennych oraz wyboru odpowiedniego wskaźnika (indykatora) rozmiaru.

W kolejnym podrozdziale tego rozdziału scharakteryzowano dwa typy interakcji przestrzennych: sąsiedztwo i odległość, oraz omówiono problem wzajemnych granic i interakcji między obiektami w przestrzeni. W celu uzyskania możliwości ilościowego ujęcia współzależności przestrzennych pokazane zostały problemy kwantyfikacji w postaci macierzy sąsiedztwa (kontyngencji) oraz z wykorzystaniem pojęcia odległości – macierze odległości (dystansu). Przy specyfikacji i identyfikacji zależności przestrzennych znajomość typowych macierzy powiązań przestrzennych, tzw. macierzy wag, takich jak: macierz najbliższego sąsiedztwa, macierz granic czy odległości, umożliwia zrozumienie istoty problemu. Uwzględnienie macierzy wag o bardziej złożonej strukturze – wykorzystujących np. odległość ekonomiczną, społeczną i in. – przygotowuje Czytelnika do rozwiązywania bardziej złożonych problemów ekonomicznych. Prezentowane przykłady umożliwią zdobycie praktycznych umiejętności doboru i konstrukcji macierzy wag.

W rozdziale drugim (*Klasyfikacja, źródła informacji i wizualizacja danych przestrzennych*) zdefiniowano różne typy danych statystycznych wykorzystywanych w ekonomicznych analizach przestrzennych. Scharakteryzowano instytucje odpowiadające za gromadzenie danych oraz zaprezentowano źródła danych, takie jak roczniki i inne wydawnictwa statystyczne oraz specjalistyczne strony internetowe zawierające różne banki danych.

W rozdziale tym pokazano również możliwości prezentacji graficznej (wizualizacji) danych przestrzennych i przestrzenno-czasowych oraz rekomendacje odpowiedniego oprogramowania komputerowego umożliwiającego odpowiednią, profesjonalną wizualizację danych statystycznych w postaci map, wykresów i grafów.

W ostatniej części rozdziału drugiego omówione są podstawowe metody grupowania i klasyfikacji stosowane w badaniach ekonomicznych. Najczęściej stosowanym narzędziem grupowania i klasyfikacji obiektów w badaniach ekonomicznych jest taksonomia numeryczna (*numerical taxonomy*), zwana również analizą skupień (*cluster analysis*). Taksonomia jest to dziedzina wiedzy (zbiór metod) zajmująca się pomiarem, ilościowym opisem oraz analizą związków strukturalnych występujących w zbiorze obiektów wielocechowych [Hellwig, 1994]. Metody taksonomii umożliwiają m.in. podział zbioru obiektów na rozłączne podzbiory, tj. grupy, klasy czy skupienia, które zawierają elementy podobne do siebie z punktu widzenia wyróżnionej charakterystyki agregatowej, a jednocześnie różniące się od elementów pozostałych podzbiorów. Metody te często wykorzystywane są w badaniach przestrzennych do porównywania i grupowania obiektów przestrzennych, takich jak kraje, regiony, województwa, powiaty, ze względu na poziom rozwoju gospodarczego, poziom i jakość życia ludności, rozwój demograficzny, jakość środowiska naturalnego itp.

W rozdziale omówiono poszczególne etapy grupowania, tj.: określenie charakteru zmiennych, normalizacja zmiennych, wyznaczenie odległości między

badanymi jednostkami, budowa macierzy odległości, która jest podstawą tworzenia skupień. Opisano również najczęściej wykorzystywane w badaniach ekonomicznych metody aglomeracyjne, tj.: metodę pojedynczego wiązania, metodę środków ciężkości, metodę Warda oraz grupowanie metodą k -średnich. Przedstawione przykłady wskazują na praktyczne możliwości zastosowania opisanych metod.

W rozdziale trzecim (*Elementy geostatystyki i metody analizy przestrzennych danych punktowych*) omówiono podstawowe zagadnienia dotyczące nowoczesnych metod statystyki przestrzennej. Statystyka przestrzenna jest działem dotyczącym badań zależności przestrzennych w wielu dziedzinach wiedzy, takich jak rolnictwo, geografia, astronomia, biologia, epidemiologia. W kolejnych częściach tego rozdziału prezentowane są zagadnienia z zakresu geostatystyki oraz interpolacji danych statystycznych. Geostatystyka to zbiór narzędzi statystycznych opartych na teorii funkcji losowych, które uwzględniają w analizie danych ich przestrzenną i czasową lokalizację. Do najważniejszych zadań geostatystyki należy opis struktury przestrzennej (lub czasowej) zjawiska, estymacja wartości parametru w „nie próbowanym” miejscu (lub momencie) oraz modelowanie niepewności szacunków przez generowanie alternatywnych obrazów (realizacji), które są rezultatem wyników symulacji przestrzennej lub czasowej zjawiska. W rozdziale tym omówione są podstawowe miary geostatystyki, do których należą miary pozycyjne, m.in. mediana przestrzenna, zmienna zregionalizowana oraz semiwariogram. Nowatorstwo geostatystyki polega właśnie na szacowaniu zmienności parametrów za pomocą tzw. zmiennej zregionalizowanej. Wartości tej zmiennej są funkcją współrzędnych położenia punktów pomiaru. Strukturę zmienności opisuje, w syntetycznej formie, tzw. semiwariogram. Zmienność analizowanego parametru w tradycyjnym ujęciu wyrażana jest za pomocą prostych miar statystycznych – wartości średniej, odchylenia standardowego itd. Ograniczeniem tych mierników jest brak informacji o lokalizacji danej cechy. Ta istotna część informacji jest tracona bezpowrotnie. W metodach geostatystycznych uwzględnia się położenie badanych zjawisk w przestrzeni i wynikające z tego korelacje.

W dalszej części rozdziału omówiona jest nowoczesna metoda interpolacji danych przestrzennych – kriging. Twórcą tej metody jest południowoafrykański geolog D. Krige [1951]. Interpolacja danych przestrzennych oznacza oszacowanie wartości danych statystycznych znajdujących się między znanymi wartościami. Techniki przestrzennej interpolacji danych są szeroko stosowane do modelowania zjawisk z dziedziny geologii, geografii, geofizyki, ekologii czy energetyki. Metoda krigingu jest coraz częściej stosowana również do symulacji procesów ekonomicznych mających wymiar przestrzenny.

W ostatniej części rozdziału trzeciego prezentowane są również metody analiz rozmieszczenia punktowych danych w przestrzeni (*point patterns analysis*), które pozwalają określić, czy zjawisko występuje w przestrzeni w postaci zgrupowań, czy też rozłożone jest losowo lub regularnie. Wykorzystywane są do tego celu miary Ripleya K i L oparte na analizie gęstości punktów zliczanych w poruszającym się okręgu, kilkukrotnie zmieniającym wielkość w danej lokalizacji.

Rozdział czwarty (*Miary i testy statystyczne w eksploracyjnej analizie danych przestrzennych*) dotyczy podstawowego problemu statystycznych i ekonometrycznych badań przestrzennych, tzn. zjawiska autokorelacji przestrzennej. Przedstawiono tu definicje dodatniej i ujemnej autokorelacji przestrzennej oraz przyczyny jej występowania. Oprócz podania podstawowych pojęć i definicji związanych z problemami autokorelacji przestrzennej prezentowane są metody testowania występowania lokalnych i globalnych zależności przestrzennych. Omówiono podstawowe własności statystyki globalnej i lokalnej autokorelacji przestrzennej (statystyka *I* Morana, test Walda oraz test *LM* mnożnika Lagrange'a).

W rozdziale piątym (*Koncentracja i specjalizacja w przestrzennych analizach ekonomicznych*) omówione zostały problemy lokalizacji, koncentracji oraz specjalizacji działalności gospodarczej w przestrzeni geograficznej.

Pierwszy podrozdział poświęcony jest analizie rozmieszczenia przestrzennego: koncentracji i specjalizacji, która wiąże się z problemem ekwiwalentności między obserwacjami w przestrzeni. Podstawowym instrumentem badania koncentracji jest krzywa Lorenza – klasyczne narzędzie analizy nierówności w populacji, pozwalające na dobre uwidocznienie tego zjawiska. W rozdziale scharakteryzowano również inne mierniki koncentracji przestrzennej, takie jak: wskaźnik Isarda, rozbieżności, kwadratowy, Chi-kwadrat, Gibbsa-Martina, Herfindahla, Theila czy współczynnik Giniego.

W rozdziale szóstym (*Analizy strukturalno-geograficzne*) zaprezentowano problematykę badań, które najczęściej przeprowadza się z zastosowaniem metody przesunięć udziałów (*shift-share*) lub analizy wariancji (ANOVA). Metody te są stosowane do badania zmian gospodarczych w regionie przez dekompozycję trzech składowych: potencjału badanego obszaru na tle rozwoju obszaru referencyjnego, struktury przedsiębiorstw badanego obszaru i konkurencyjności badanego obszaru [Dunn, 1960]. Analiza *shift-share* jest jedną z najtrafniejszych i najczęściej stosowanych technik do badania poziomu rozwoju danego obszaru na tle poziomu rozwoju obszaru referencyjnego (województwa). Wyniki analizy dostarczają informacji niezbędnych do zrozumienia i selekcji kluczowych rodzajów działalności dla rozwoju regionu [Dinc, 2002].

Oprócz metody podstawowej w dalszej części rozdziału omówiono także nowoczesne, przestrzenne podejście do techniki *shift-share*. Modele zawierające jedynie analizę przekrojową regionów i z góry zakładające istnienie „płaskich” współzależności między badanymi obiektami, zostały wzbogacone o element zależności przestrzennych. Dynamika zmian strukturalnych zjawisk ekonomicznych danej przestrzennej jednostki zależy od sąsiadujących w przestrzeni regionów, ale niekoniecznie tych „najbliższych”. Rozwiązaniem problemu różnokierunkowości przestrzennych zależności regionów jest implementacja do analizy *shift-share* przestrzennych macierzy wag. W tej części rozdziału omówiono poszczególne etapy modyfikacji klasycznego podejścia *shift-share*. Dodatkowo opisano procedury testowe wykorzystywane do stwierdzenia istotności poszczególnych efektów, łącznego ich występowania oraz do przeprowadzania analiz różnicowania efek-

tów w dwóch strefach geograficznych. Z uwagi na występowanie w analizach *shift-share* problemu specyfikacji efektów strukturalnych i geograficznych przedstawiono również analizę wariancji rozmieszczenia przestrzennego.

Rozdział siódmy (*Nowa ekonomia geograficzna i modele specjalne*) stanowi wprowadzenie do zagadnień z zakresu nowej ekonomii geograficznej ze szczególnym uwzględnieniem modeli i narzędzi badań ilościowych tam stosowanych.

W pierwszej części rozdziału zaprezentowano zarys historyczny i kierunki rozwoju nowej ekonomii geograficznej. Za prekursora tej dziedziny wiedzy powszechnie uważany jest noblista P.R. Krugman, który w 1991 r. zapoczątkował nowy nurt w ekonomii geograficznej, prezentując model równowagi przestrzennej alokacji aktywności ekonomicznych. Nowością było tu wprowadzenie czynnika łącznej międzyregionalnej mobilności siły roboczej do modelu opisującego handel międzynarodowy. Dzięki temu zrozumiano, że przestrzenne rozmieszczenie (lokalizacja) aktywności ekonomicznych może być zmienną endogeniczną. Zadaniem nowej ekonomii geograficznej jest wyjaśnienie koncentracji i aglomeracji bądź dyspersji zjawisk ekonomicznych w przestrzeni geograficznej.

W drugiej części rozdziału opisano modele przyczynowo-skutkowe nowej ekonomii geograficznej. Zaprezentowano model Krugmana, który jest oparty na modelu konkurencji monopolistycznej z 1977 r. autorstwa A. Dixita i J. Stiglitz. Model ten umożliwia pokazanie, jak interakcje między zwiększającą się skalą produkcji, kosztami transportu i czynnikami mobilności powodują pojawienie się, a nawet zmianę przestrzennej struktury ekonomicznej (koncentrację, aglomerację, bądź dyspersję). Przytoczono również wyniki empirycznej weryfikacji modelu Krugmana autorstwa Garcia-Pires [2006], który zastosował ten model w analizie wynagrodzeń przeciętnych w Hiszpanii.

W dalszej części rozdziału zaprezentowano podstawowe modele ekonometryczne wyjaśniające mechanizm kształtowania się i rozwoju zjawisk ekonomicznych mających aspekt przestrzenny.

Najpierw omówiono modele trendu powierzchniowego, w których zmienne niezależne stanowią współrzędne położenia geograficznego lub odległości od pewnego punktu orientacyjnego. Parametry tego modelu odzwierciedlają siłę i kierunek regionalnych tendencji w rozwoju przestrzennej struktury zjawiska.

Następnie scharakteryzowano modele dyfuzji przestrzennej, wśród których wyróżniamy modele deterministyczne i probabilistyczne. Modele te wykorzystywane są w badaniach nad dyfuzją różnych zjawisk społeczno-ekonomicznych w przestrzeni, np.: przemieszczenie się ludności, informacji, innowacji itp.

W kolejnym podrozdziale przedstawiono modele grawitacji, ciężenia i potencjału, które mogą być wykorzystywane do badania migracji ludności, przepływów pieniężnych, przestrzennej zmienności dochodów itp. W modelach tych analizowane są wzajemne oddziaływania między poszczególnymi parami jednostek w przestrzeni.

W rozdziale ósmym (*Modele regresji przestrzennej*) prezentowane są: modele z przestrzenną autoregresją zmiennej zależnej, modele z autokorelacją

przestrzenną składnika losowego SEM (*Spatial Error Model*), modele mieszane regresyjno-autoregresyjne (*Mixed Autoregressive*) oraz ogólny model przestrzenny SGM (*Spatial General Model*). Szeroko omówione zostały etapy konstrukcji ekonometrycznych modeli przestrzennych, począwszy od wyboru macierzy odległości i sformułowania macierzy wag, przez wybór schematu struktury interakcji przestrzennych. W drugiej części rozdziału dyskutowane są także problemy modelowania heterogeniczności przestrzennej. Zaprezentowano modele jednorównaniowe i metody modyfikacji pozwalające na uwzględnienie heteroskedastyczności składników losowych w przypadku danych przestrzennych, począwszy od ujęcia klasycznego – metody White’a, przez założenie heteroskedastyczności grupowej, do konstrukcji i estymacji modeli ze zmiennymi parametrami (VE, GWR, DARP). W zakończeniu zwrócono uwagę także na problemy interakcji heteroskedastyczności i autokorelacji przestrzennej.

W rozdziale dziewiątym (*Estymacja modeli regresji przestrzennej*) prezentowane są metody i praktyczne problemy estymacji modeli przestrzennych. Oprócz dyskusji możliwości zastosowań zwykłej i uogólnionej metody najmniejszych kwadratów oraz metody największej wiarygodności, omawiane są inne, alternatywne metody estymacji modeli regresji przestrzennej, które stają się coraz bardziej popularne ze względu na większą prostotę obliczeń numerycznych. W szczególności, w badaniach empirycznych można obecnie korzystać z prezentowanych w tym rozdziale nowych procedur: metody zmiennych instrumentalnych MZI, uogólnionej metody momentów UMM oraz uogólnionej przestrzennie podwójnej metody najmniejszych kwadratów UP2MKN.

W rozdziale dziesiątym (*Weryfikacja statystyczna i zastosowania modeli regresji przestrzennej*) dokonano klasyfikacji testów stosowanych zarówno przy weryfikacji statystycznej, jak i przy wyborze odpowiedniego wariantu modelu regresji przestrzennej. Oprócz problemów weryfikacji statystycznej i strategii wyboru modeli z autoregresją lub autokorelacją przestrzenną, prezentowane są również odpowiednie testy i problemy weryfikacji modeli w warunkach jednoczesnego występowania w próbie statystycznej autokorelacji i heterogeniczności przestrzennej. W końcowej części rozdziału pokazano przykłady modelowania, estymacji i testowania modeli przestrzennych, zarówno na danych dla Polski (model stopy bezrobocia według powiatów, 379 obserwacji), jak i na danych należących już do klasyki ekonometrii przestrzennej, mianowicie pochodzących z wczesnych badań Anselina [1988] dotyczących kradzieży i włamań w mieście Columbus (44 obserwacje, przykład opracowany przez J. LeGallo).

Całość zawartej w książce tematyki dopełnia obszerna bibliografia (literatura cytowana) oraz zakończenie, w którym sygnalizowane są możliwości zastosowania specjalistycznego oprogramowania komputerowego umożliwiającego zastosowanie zaawansowanych technik ekonometrii przestrzennej. Wiele nowoczesnych narzędzi ekonometrii przestrzennej nie zostało jeszcze oprogramowanych w gotowych (komercyjnych) pakietach ekonometrycznych. Dlatego też rekomendowane jest korzystanie z procedur i specjalnych toolboxów napisanych w językach progra-

mowania wysokiego poziomu R i MATLAB. Wiele gotowych procedur i funkcji napisanych w tych językach jest już ogólnie dostępnych w Internecie na zasadach *open source*. Przykładem może tu być wyspecjalizowany zbiór funkcji (podprogramów) MATLAB-a pod nazwą *Spatial Toolbox* autorstwa J.P. LeSage'a oraz pakiet Spdep pisany w języku R.

Rozdział 1. Wprowadzenie do przestrzennych analiz ekonomicznych

1.1. Rozwój metodologii i zastosowań ekonometrii przestrzennej

Pierwsze badania z zakresu statystyki i ekonometrii przestrzennej datowane są na wczesne lata pięćdziesiąte XX w. (prace i publikacje Morana, Geary'ego, Whittle'a). Jednak oficjalnie za początek nowej, odrębnej dziedziny wiedzy – **ekonometrii przestrzennej** – uznaje się lata siedemdziesiąte XX w.

W 1970 r. W.R. Tobler¹, analizując obserwowane zależności i interakcje między zmiennymi w przestrzeni, sformułował tzw. **pierwsze prawo geografii** (*First Law of Geography*), które wkrótce stało się podstawą wszelkich analiz przestrzennych. Prawo to można również nazwać **pierwszym prawem ekonometrii przestrzennej** lub ogólnie: **prawem empirycznych analiz przestrzennych**. Brzmi ono następująco:

„Wszystko jest powiązane ze sobą, ale bliższe obiekty są bardziej zależne od siebie niż odległe”.

W 1974 r. na posiedzeniu Holenderskiego Towarzystwa Statystycznego J.H.P. Paelinck wprowadził pojęcie **ekonometria przestrzenna**, nadając tym samym nazwę nowej dziedzinie wiedzy. W 1979 r. J.H.P. Paelinck i L.H. Klaassen, w pierwszej książce poświęconej w całości zagadnieniom z zakresu ekonometrii przestrzennej, podkreślili znaczenie przestrzennego modelowania zmiennych ekonomicznych. Zwrócili uwagę na fakt, iż poszczególne jednostki przestrzenne (tj. województwa, regiony, państwa) podlegają wpływom innych jednostek oraz zależą od zachodzących tam zmian ekonomicznych, społecznych i politycznych. Zauważyli, iż uwzględnienie aspektów przestrzennych w modelowaniu ekonometrycznym umożliwi uzyskanie bardziej szczegółowych informacji na temat systemów ekonomicznych. Łącząc metody ekonometrii, ekonomii oraz geografii, zapoczątkowali rozwój **ekonometrii przestrzennej**. Dla podkreślenia różnic i specjalnych uwarunkowań badań empirycznych na podstawie danych

¹ W oryginale angielskim „*first law of geography*” Waldo Toblera jest wyrażone następująco: „*Everything is related to everything else, but near things are more related than distant things*” [zob. Tobler, 1970, s. 236].

przestrzennych sformułowali **pięć podstawowych zasad** analiz i konstrukcji modeli przestrzennych².

Postulowali mianowicie, iż w badaniach przestrzennych należy uwzględnić:

- 1) **współzależność przestrzenną** zmiennych endogenicznych,
- 2) **asymetrię i heterogeniczność** relacji w przestrzeni,
- 3) **allotopię** (istotny wpływ czynników objaśniających z innych lokalizacji przestrzennych),
- 4) **odmienne interakcje *ex ante* i *ex post*** (dla odróżnienia zjawisk instalacji i funkcjonowania),
- 5) **charakterystyki przestrzeni** – współrzędne obszarów i punktów, miary odległości i natężenia dla zmiennych zlokalizowanych.

1. **Współzależność przestrzenna** oznacza, że specyfikacja zmiennych objaśniających w modelach dokonywana jest *a priori* w sposób niezależny od faktu dysponowania danymi zlokalizowanymi. Dopiero *ex post* bierze się pod uwagę wielokierunkowe i równoczesne zależności przestrzenne. Na przykład w modelowaniu dochodów i wydatków należy uwzględnić, że każdy wydatek w określonym miejscu powoduje powstawanie w tym miejscu dochodów, których część może być z kolei wydawana w innych miejscach. Powoduje to powstawanie nowych dochodów w różnych miejscach badanego zbioru jednostek przestrzennych.
2. **Asymetria i heterogeniczność** relacji w przestrzeni wynikają z różnic w charakterystykach wielkości i potencjału ekonomicznego sąsiadujących obiektów i obszarów. Można stwierdzić empirycznie, że w większości przypadków wzajemne relacje ekonomiczne (import – eksport, dochody – wydatki, kooperacja – specjalizacja itd.) między badanymi jednostkami przestrzennymi są zróżnicowane ze względu na wielkość lub poziom zmiennych (heterogeniczne i asymetryczne).
3. **Allotopia** oznacza, że dla prawidłowego wyjaśnienia kształtowania się zjawisk i procesów w poszczególnych lokalizacjach należy uwzględnić istotny wpływ czynników objaśniających z innych lokalizacji przestrzennych. Przykładem klasycznym jest tzw. trójkąt Webera dotyczący optymalnej lokalizacji firmy w takim miejscu, które nie jest ani rynkiem zbytu, ani nie jest źródłem czynników produkcji. Natomiast rynki zbytu i źródła czynników produkcji znajdują się w lokalizacjach sąsiednich. Zjawiska przemieszczania się i porównanie zysków oraz niedogodności wynikających z wybranej lokalizacji z innymi możliwościami mogą dopiero wyjaśnić trafność dokonanego wyboru. Podobnie istotność przepływów migracyjnych między dwoma obszarami geograficznymi opisywana jest nie tylko w miejscach pochodzenia i miejscach docelowych, ale także przez sytuacje w innych, alternatywnych lokalizacjach.

² W oryginale: „five principles of spatial econometrics” [Paelinck, Klaassen, 1979, wydanie polskie Paelinck, Klaassen, 1983, s. 14–22]; zob. także [Ancot i in., 1990, s. 141–155].

4. **Odmienne interakcje *ex ante* i *ex post*** między zmiennymi geograficznie zlokalizowanymi należy uwzględnić w celu odróżnienia zjawisk funkcjonowania (*ex post*) od zjawisk inwestowania i instalacji (*ex ante*). Ta zasada jest szczególnie widoczna w modelowaniu lokalizacji przemysłowych na podstawie danych regionalnych. Obliczane współczynniki dobrze oddają relatywne przyciąganie i efekty wpływu potencjalnych lokalizacji na inwestorów poszukujących miejsca, ale nie biorą pod uwagę późniejszych kosztów transportu, które są podstawą funkcjonowania przedsiębiorstw w wybranych lokalizacjach. Ponadto, zjawisko to uwzględniane jest w modelach wyboru miejsca zamieszkania uwzględniających aktualne trendy migracyjne.
5. **Uwzględnianie zróżnicowania charakterystyk przestrzeni** (miar odległości i natężenia, kosztów transportu itd.) dla objaśniania zmiennych zlokalizowanych wynika stąd, iż charakterystyki te związane są bezpośrednio z aktywnością ekonomiczną i społeczną w przestrzeni geograficznej i nie można stosować tutaj podejścia klasycznego, „punktowego”, tak jak w znanych modelach makroekonomicznych.

Oprócz pięciu podstawowych zasad w ekonometrii przestrzennej analizowane są także problemy kierunków i siły oddziaływań poszczególnych obszarów. Chodzi tutaj o tzw. **zasadę izotropowości**, czyli jednakowej siły oddziaływania danej lokalizacji we wszystkich kierunkach (na wszystkich sąsiadów), która jest stosowana najczęściej, w odróżnieniu od rzadziej postulowanej **anizotropowości** – zróżnicowanych oddziaływań w zależności od kierunku.

Dane przestrzenne są więc znacznie bardziej skomplikowane w swojej strukturze niż szeregi czasowe, dlatego też nie można analizować ich za pomocą klasycznych metod ilościowych. Wymagają specjalistycznych metod, dzięki którym można uniknąć problemów powstających na skutek wprowadzenia efektów przestrzennych do modelu ekonometrycznego (autokorelacja i heterogeniczność przestrzenna, asymetria, allotopia, anizotropia).

Pierwsze testy i metody estymacji modeli ekonometrycznych uwzględniających aspekt przestrzenny powstały w latach siedemdziesiątych XX w., dzięki badaniom A.D. Cliffa, J.K. Orda, L. Hordijka, L.H. Klaassena, H. Blommesteina, L. Hansena, P. Nijkampa, J.H.P. Pealincka i innych [zob. Ord, Cliff, 1973; Hordijk, 1974; Hordijk, Paelinck, 1976; Hordijk, Nijkamp, 1977; Paelinck, Klaassen, 1979; Hansen, 1982; Blommestein, 1983]. Wtedy to wprowadzono pojęcia takie, jak: interakcje przestrzenne, efekty przestrzenne, autokorelacja i heterogeniczność przestrzenna, opóźnienia przestrzenne.

Autorem pierwszej monografii podręcznikowej z zakresu ekonometrii przestrzennej jest Luc Anselin [1988]. Książka ta stała się najbardziej znaczącą i najczęściej cytowaną pozycją z tego zakresu. To właśnie w niej możemy znaleźć ogólnie przyjętą na całym świecie **definicję ekonometrii przestrzennej** [zob. Anselin, 1988].

Ekonometrię przestrzenną można określić dwojako. Mianowicie jest to:

- 1) nauka, której celem jest wyjaśnienie oraz opis zjawisk i procesów gospodarczych mających aspekt przestrzenny za pomocą metod ekonometrycznych,
- 2) zbiór technik, dzięki którym można uniknąć problemów metodologicznych powstających na skutek wprowadzenia efektów przestrzennych do modelu ekonometrycznego (autokorelacji i heterogeniczności przestrzennej, asymetrii, allotropii, anizotropii).

Wkład L. Anselina w rozwój ekonometrii przestrzennej jest bardzo duży³. Napisał on wiele książek i artykułów dotyczących specyfiki danych przestrzennych oraz szeroko pojmowanych zależności w przestrzeni [zob. Anselin, 1989, 1990]. Skonstruował odpowiednie narzędzia w programach komputerowych SpaceStat i GeoDa umożliwiające estymację modeli i wszelkie analizy danych przestrzennych. We współpracy z innymi naukowcami sukcesywnie doskonalił oraz unowocześniał metody i narzędzia służące wprowadzaniu efektów przestrzennych do modeli ekonometrycznych [Anselin, Rey, 1991, Anselin, Florax, 1995, Anselin, Kelejian, 1997; Anselin i in., 1997; Anselin, Bera, 1998; Anselin i in., 2004].

Początkowo metody ekonometrii przestrzennej wykorzystywane były jedynie w badaniach regionalnych, w analizach rynku nieruchomości oraz w geografii ekonomicznej. Jednakże w latach dziewięćdziesiątych XX w. przestrzeń zaczęła odgrywać bardzo ważną rolę w teorii ekonomii oraz w nowej ekonomii geograficznej (zob. rozdz. 4). Wzrosło zainteresowanie testowaniem występowania zależności przestrzennych oraz specyfikacją i estymacją modeli ekonometrycznych uwzględniających te zależności. Nastąpił szybki rozwój metodologii ekonometrii przestrzennej. Wprowadzono nowe estymatory, testy statystyczne oraz rozkłady statystyk w małej próbie. Pojawiła się fachowa literatura przedmiotu w postaci publikacji książkowych poświęconych w całości zagadnieniom z zakresu ekonometrii przestrzennej. Zadaniem tej dziedziny wiedzy stało się wprowadzenie efektów przestrzennych do modeli ekonometrycznych, ich estymacja, specyfikacja testów sprawdzających obecność efektów przestrzennych oraz prognozowanie przestrzenne. Nauka ta umożliwiła badanie interakcji zachodzących w przestrzeni, wyodrębnianie efektów grupowych oraz efektów sąsiedztwa, analizowanie wpływu poszczególnych jednostek przestrzeni na ogólny poziom badanej cechy.

Z biegiem czasu zakres badań ekonometrii przestrzennej znacznie się poszerzył. Naukowcy zajmowali się problematyką analizy zarówno danych przestrzennych, jak i danych uwzględniających dynamikę, danych przestrzenno-czasowych oraz panelowych [zob. np. Arellano, 2003; Baltagi, Song, Koh, 2003; Hsiao, 2003; Baltagi, 2005; Matyas, Sevestre, 2006]. Opracowano specjalistyczne oprogramowanie komputerowe umożliwiające analizowanie danych przestrzennych i przestrzenno-czasowych oraz wykorzystywanie zaawansowanych technik

³ Niewątpliwie do rozwoju ekonometrii przestrzennej przyczynili się również inni wybitni naukowcy, np. R. Florax, D. Griffith, A. Getis, J. Mur, H. Zoller, J.P. LeSage, S. Rey, J.P. Elhorst, G. Arbia, N. Cressie, B. Baltagi., A. Can, A. Case, H.S. Rosen, R. Dubin, L. Arellano, I. Prucha, P. Robinson i wielu innych.