

Zastosowanie wskaźników koncentracji przestrzennej w badaniu procesów *urban sprawl**

*Application of spatial concentration indicators in the studies
of urban sprawl processes*

PAWEŁ SUDRA

Institut Geografii i Przestrzennego Zagospodarowania im. S. Leszczyckiego PAN
00-818 Warszawa, ul. Twarda 51/55; p.sudra@twarda.pan.pl
Instytut Gospodarki Przestrzennej i Mieszkalnictwa
03-728 Warszawa, ul. Targowa 45; pawel.sudra@igpim.pl

Zarys treści. Artykuł zawiera krytyczny przegląd wybranych metod wskaźnikowych umożliwiających analizę koncentracji i rozpraszania osadnictwa. Wybrano cztery mierniki: współczynnik Giniego, wskaźnik *C* Kostrubca, metodę najbliższego sąsiada (indeks Clarka-Evansa) oraz entropię Shannona. Każdy ze wskaźników przeanalizowano, biorąc pod uwagę jego podstawy teoretyczno-matematyczne, przyjęte rozumienie pojęcia koncentracji, wpływ delimitacji przestrzennych na rezultat analiz i dostępne metody prezentacji wyników. Zwrócono uwagę na potencjalne pola zastosowań, szczególnie w kontekście zjawiska żywiolowego rozprzestrzeniania się zabudowy, *urban sprawl*. Wskazano cechy wskaźników, które stanowią o ich komplementarności w badaniu procesów rozpraszania osadnictwa.

Słowa kluczowe: wskaźniki koncentracji, koncentracja przestrzenna, rozpraszanie zabudowy, *urban sprawl*, suburbanizacja.

Wprowadzenie

Wskaźniki koncentracji przestrzennej są szeroko stosowane w badaniach układów osadniczych i przemian urbanizacyjnych. Znaczne zasługi dla metodologii badań koncentracji zjawisk w sieci osadniczej mają polscy geografowie, którzy zajmowali się tym zagadnieniem już w latach 1930. i 1940. (Uhorczak, 1932; Zierhoffer, 1934; Steinhaus, 1947). Najszerzej problematykę analizował

* Artykuł opracowany w ramach realizacji projektu badawczego nr 2014/15/N/HS4/01343: „Procesy rozpraszania zabudowy w aglomeracji warszawskiej po 1989 roku w różnych skalach przestrzennych”, finansowanego ze środków Narodowego Centrum Nauki, w ramach konkursu „PRELUDIUM 8”.

w latach 1970. B. Kostrubiec (1971, 1972, 1977; Golachowski i inni, 1974), który opracował i opisał wiele metod, zarówno w odniesieniu do układów punktowych, jak i do powierzchni osadniczych. Od czasu, gdy ukazywały się wyniki badań B. Kostrubca, mimo kreatywnego czerpania z jego dorobku przez innych autorów, aplikacji wypracowanych metod i propozycji nowych wskaźników (Jażdżewska, 1999, 2008; Śleszyński, 2013; Szmytkie, 2014), brak jest prac o charakterze przekrojowym, gdzie dostępne wskaźniki poddane byłyby krytycznej ocenie. Na znaczeniu zyskał również kontekst badań nad rozpraszaniem zabudowy, związany z żywiolową suburbanizacją i procesami ujmowanymi pod pojęciem *urban sprawl*.

Artykuł zawiera przegląd wybranych wskaźników koncentracji przestrzennej, mający na celu określenie i ocenę ich przydatności do badania zjawisk związanych z urbanizacją i rozwojem osadnictwa, a szczególnie układów przestrzennych powstających w wyniku procesów *urban sprawl*. Przyjęto założenie, że zjawisko określane tym mianem wiąże się z rozpraszaniem zabudowy, zatem ten jego aspekt może być badany za pomocą wskaźników koncentracji przestrzennej.

Założenie to ma swoje uzasadnienie, gdyż badania wskazują na postępujące rozpraszanie zabudowy jako najbardziej prawdopodobny scenariusz rozwoju przestrzennego miast, a kształtujące się w ten sposób miasto rozproszone (ang. *dispersed city*), cechujące się dekoncentracją typowo miejskich form użytkowania, o wyraźnych cechach *urban sprawl*, przeciwstawiane jest celowo kształtowanemu miastu kompaktowemu (ang. *compact city*) (Dieleman i Wegener, 2004).

Wskaźniki do analizy dobrano uwzględniając metody badawcze, które znajdują się w kanonie metodologii geograficznej, chociaż wywodzą się z różnych nauk i opierają na zróżnicowanym aparacie matematycznym. Wyselekcjonowano cztery mierniki:

- 1) współczynnik Giniego (wskaźnik skumulowanej koncentracji),
- 2) wskaźnik koncentracji *C* (wskaźnik B. Kostrubca),
- 3) metoda najbliższego sąsiada (indeks Clarka-Evansa),
- 4) entropia Shannona.

W rozważaniach wzięto pod uwagę podstawy teoretyczne wskaźników, przyjęte rozumienie pojęcia koncentracji (skupienia) i rozproszenia (dekoncentracji), podstawy matematyczne i przyjęte miary, a następnie starano się zidentyfikować zalety (mocne strony) mierników i ich wady (słabe strony), związane z: łatwością prowadzenia analiz, stosowalnością w różnych skalach przestrzennych i dziedzinach zastosowań, zakresem zmienności i niepewności wyników, związanym m.in. z doбором różnych delimitacji przestrzennych, dostępnymi metodami prezentacji graficznej wyników. Wskaźniki umożliwiają określenie stanu zagospodarowania przestrzeni w wybranym punkcie czasu oraz pozwalają na identyfikację zachodzących procesów urbanizacji.

Urban sprawl jako zjawisko przestrzenne

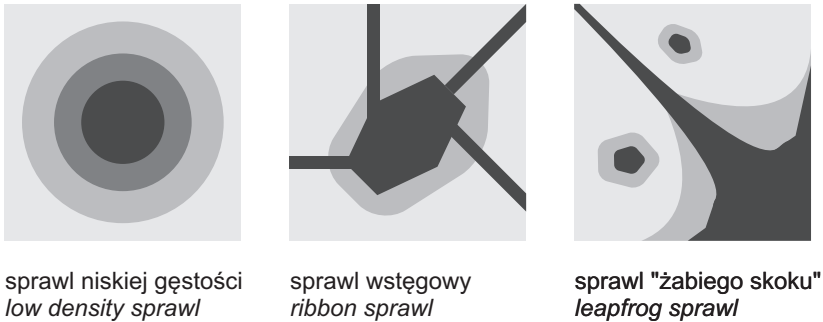
Urban sprawl (dosłownie: „rozlewanie się miast”) jest zjawiskiem wyrażającym się w różnorodnych formach przestrzennych, związanym z rozprzestrzenianiem się obszarów urbanizacji, skutkującym często narastającym chaosem w zagospodarowaniu przestrzeni. Pojęcie zostało użyte po raz pierwszy przez amerykańskiego urbanistę E. Drapera w 1937 r. i określało nieatrakcyjną i nieekonomiczną formę ekspansji miasta. Do dziś wśród badaczy nie ma zgodności co do definicji tego zjawiska (Torrens i Alberti, 2000; Chin, 2002, Franz i inni, 2006), często jego skutki mylone są z przyczynami, gdyż charakteryzuje je występowanie licznych sprzężeń zwrotnych. Zdaniem A. Frenkela i D. Orensteina (2011), *urban sprawl* może być definiowany na trzech poziomach: rozwoju przestrzennego urbanizacji, konsekwencji i skutków oraz procesów społeczno-ekonomicznych leżących u podstaw zmian przestrzennych.

Urban sprawl ma swój wyraz w migracjach ludności, rozpraszaniu zabudowy, przemieszczaniu miejsc pracy do strefy podmiejskiej czy zwiększeniu ruchu samochodowego. Może być ujmowane zarówno jako proces zachodzący w cyklu życia miasta, związany z żywiołową, wymykającą się kontroli planistycznej i administracyjnej, suburbanizacją, jak i stan wynikowy, będący następstwem tego procesu, przyjmujący określone formy przestrzenne. Procesy rozlewania się miasta w skali dużych aglomeracji określane są mianem „metropolitalnej dekoncentracji” (Squires, 2002). W strefie podmiejskiej, gdzie intensywność użytkowania ziemi oraz jego wielofunkcyjność są niższe niż w mieście, ale wyższe niż na wsi (Straszewicz, 1985; Dziewoński, 1987), zachodzi tworzenie się zbioru jednostek osadniczych o cechach „kontinuum miejsko-wiejskiego” (Chojnicki i Czyż, 1989). Presja urbanizacyjna powoduje pojawianie się układów rozproszonej zabudowy, które cechuje niejednorodność, nieciągłość i niska intensywność wykorzystania terenu (Batty i inni, 2002; Soule, 2006), na obrzeżach miasta i w dalej położonych obszarach regionu miejskiego (Lisowski i Grochowski, 2009).

Najczęściej obserwowane formy przestrzenne (morfologiczne) *urban sprawl* to:

- *low density sprawl* (*sprawl* niskiej gęstości) – obrastanie miasta pierścieniem suburbiów, amorficzne struktury przestrzenne, rozmyta strefa przejściowa miasto–wieś, niska gęstość zabudowy, rozrost sieci infrastruktury, nienadążający za intensywnym ruchem budowlanym;
- *ribbon sprawl* (*sprawl* wstęgowy) – rozwój zabudowy wzdłuż korytarzy drogowych oraz w węzłach łączących korytarze, podczas gdy obszary położone dalej pozostają początkowo strefami zieleni lub użytkowania rolniczego i są zagospodarowywane w dalszej kolejności, gdy wzrasta wartość nieruchomości i możliwe jest doprowadzenie infrastruktury,

– *leapfrog sprawl* (*sprawl* „żabiego skoku”) – powstawanie enklaw zabudowy w środku pól czy podmiejskich obszarów leśnych, co może być powodowane topografią terenu, ale też cenami gruntów, zróżnicowaną polityką gmin i działalnością deweloperów mieszkaniowych; prowadzi do fragmentacji krajobrazu i zwiększenia wydatków na infrastrukturę (Ewing, 1997; Carruthers i Ulfarsson, 2002; Ghani i inni, 2014) (ryc. 1).



Ryc. 1. Podstawowe formy przestrzenne *urban sprawl*
 Źródło: M.R. Majid, H. Yahya (2010), zmodyfikowane przez autora.
 Basic spatial forms of urban sprawl
 Source: M.R. Majid, H. Yahya (2010), as modified by the author.

Wskaźniki koncentracji przestrzennej w badaniach procesów urbanizacji

Wskaźnik jako indyktor pozwala stwierdzić występowanie pewnej cechy, pełniąc funkcję miernika – również przedstawić jej wartość w określonej skali. Przedmiotem zainteresowania geografii są wskaźniki odnoszące się do przestrzeni geograficznej, wśród nich wskaźniki zagospodarowania przestrzennego, które P. Śleszyński (2013) definiuje jako „liczbowe przedstawienie stanu lub dynamiki danego cząstkowego elementu lub grupy elementów zagospodarowania przestrzennego”. Wyróżnia wskaźniki absolutne, wyrażone pewną bezwzględną matematyczną wielkością oraz wskaźniki relatywne, odniesione do jakiejś innej cechy, bądź określające procentowy udział danej cechy w całości zjawiska lub procesu. Inny podział uwzględnia wskaźniki strukturalno-funkcjonalne, dotyczące charakterystyki danej cechy, np. wielkości bezwzględnej i relacji w stosunku do innych elementów oraz wskaźniki topologiczne, oznaczające szczególnie sposób występowania cechy w przestrzeni geodezyjnej.

W ramach wskaźników zagospodarowania przestrzennego wyróżnić można grupę mierników określających koncentrację i rozproszenie zjawisk oraz obiektów w przestrzeni geograficznej. Podstawową kwestią przy wyznaczaniu wskaźników koncentracji osadnictwa jest ustalenie definicji rozproszenia i skupienia, zawierającej w sobie kryteria lub warunki odległości między obiektami lub obszarami zabudowy. Proces koncentracji zjawiska w przestrzeni, np. w odniesieniu do rozmieszczenia ludności czy form użytkowania ziemi, wiąże się z jego skupianiem na ograniczonym obszarze. Analogicznie, dekoncentrację (rozpraszenie) można rozumieć jako proces związany z rozmieszczaniem danego zjawiska w przestrzeni w taki sposób, że jego wystąpienia mają miejsce na całym obszarze badań, a odległości między nimi zwiększają się bądź stają się nieregularne. Główny problem stanowi określenie, czy oznacza to równomierne rozmieszczenie, układ całkowicie losowy, czy jeszcze inny, możliwy do matematycznego zdefiniowania.

Proces dekoncentracji osadnictwa miejskiego jest skutkiem występowania przewagi sił odśrodkowych, warunkowanych atrakcyjnością położenia terenów i kosztami transportu, nad siłami dośrodkowymi, powodującymi skupianie się ludności, miejsc pracy i usług w centrum jednostki osadniczej (Colby, 1933). Można wydzielić dwie jego składowe: procesy dyfuzji i dyspersji; dyfuzja wiąże się z odpływem ludności z ośrodka centralnego (rdzenia) do stref zewnętrznych, dyspersja zaś jest skutkiem tendencji do równomiernego rozmieszczenia zjawiska na danym obszarze (McKenzie, 1926). W ślad za tym rozumowaniem, rozpraszenie osadnictwa wiąże się z kształtowaniem się jednostajnego, regularnego układu i do takiego rozumienia dekoncentracji odnosi się część wskaźników. Z drugiej strony, intuicyjnie powiedzieć można, że rozpraszenie oznacza dążenie do pewnego rozmieszczenia losowego, o cechach przypadkowości, co sprawdza się, gdy obserwujemy układy zabudowy w obszarach podmiejskich, występującej często w oderwanych enklawach.

Problem zmiennej jednostki odniesienia (ang. *MAUP, modified areal unit problem*) wskazuje, że wyniki obserwacji przy różnych metodach pomiaru zależą od rozmieszczenia analizowanych danych w strefach oraz kształtu i rozmiaru obszarów wykorzystanych w analizie (Gehlke i Biel, 1934; Openshaw, 1983), którymi mogą być: jednostki administracyjne, jednostki funkcjonalne, strefy koncentryczne (pierścienie) lub sektorowe, oczka regularnej siatki (np. kwadraty). Jest to zatem rezultat, z jednej strony, arbitralnego wyznaczenia granic (ang. *zoning dimension*), a z drugiej, przyjętej skali podstawowych jednostek analizy (ang. *scale dimension*). Ponieważ zdefiniowanie optymalnych jednostek do analizy jest trudne i obciążone ryzykiem błędu, problem można częściowo rozwiązać dokonując oceny porównawczej wrażliwości wyników analizy na zmianę stopnia agregacji jednostek lub przebiegu ich granic (Kwan i Weber, 2008; Wong i inni, 2009; Stępnia, 2014).

Współczynnik Giniego (wskaźnik skumulowanej koncentracji)

Wskaźnik skumulowanej koncentracji, opracowany przez C. Giniego (1912), bazujący na krzywej M. Lorenza (1905), jest najczęściej wykorzystywany w badaniach ekonometrycznych dotyczących nierównomierności rozkładu dóbr i dochodów (np. gospodarstw domowych). Współczynnik jest statystyczną miarą koncentracji (nierównomierności) rozkładu zmiennej losowej i jako taki nie ma odniesienia przestrzennego, gdyż jest liczony dla jednej zmiennej przyporządkowanej jednostce statystycznej. Wskaźnik Giniego dla y_i obserwacji uporządkowanych w pozycji rosnącej wyraża się wzorem:

$$G(y) = \frac{\sum_{i=1}^n (2i - n - 1)y_i}{n^2 \bar{y}}$$

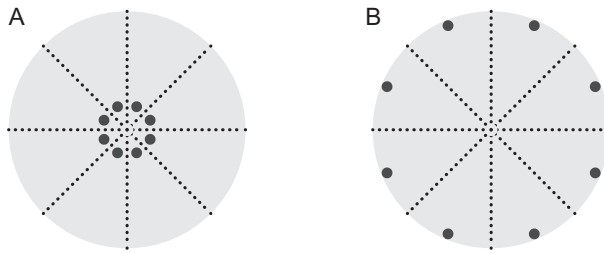
gdzie y_i to wartość i -tej obserwacji, a \bar{y} to średnia wartość wszystkich obserwacji y_i .

Omawiany miernik został zaadaptowany do badań geograficznych, w tym geografii ludności i osadnictwa, geografii gospodarczej. Statystyczną jednostką odniesienia jest wówczas jednostka przestrzenna. Dla współczynnika przyjmuje się definicję, zgodnie z którą koncentracja oznacza „skupienie masy w ramach mniejszej lub większej liczby jednostek przestrzennych” (Kostrubiec, 1972). Najczęściej stosuje się różne podziały administracyjne, ale możliwe jest również posługiwanie się siatką kwadratów, heksagonów lub innymi układami.

Maksymalna koncentracja oznacza lokalizację obiektów w jednej jednostce przestrzennej. Maksymalne rozproszenie oznacza proporcjonalny udział obiektów do liczby wydziałów przestrzennych. Nieistotna dla wartości wskaźnika jest zmiana położenia obiektów w obrębie podstawowych jednostek przestrzennych (ryc. 2). Metoda może być tak zmodyfikowana, aby wziąć poprawkę na zmienność powierzchni jednostek podstawowych – przykład wskaźnika „zestandardyzowanego” powierzchnią można znaleźć m.in. w pracy M. Stępniaaka (2014). Wówczas maksymalna koncentracja występuje przy skupieniu obiektów w najmniejszej jednostce przestrzennej, natomiast minimalna – w przypadku proporcjonalnego udziału obiektów do powierzchni wydziałów przestrzennych.

Krzywa Lorenza, która jest podstawą wyznaczenia wskaźnika, służy do pomiaru proporcjonalnego występowania par zmiennych. W badaniach geograficznych jedną zmienną jest liczba (względnie powierzchnia) jednostek terytorialnych, a drugą zmienną – zjawisko zlokalizowane w obrębie tych jednostek. Krzywa Lorenza (ryc. 3) wyznacza szereg kumulacyjny koncentracji zjawiska.

Przy proporcjonalnym wzroście cech, tzn. gdy 10% obiektów mieści się w 10% wydziałów przestrzennych, 20% obiektów w 20% wydziałów itd., krzywa koncen-

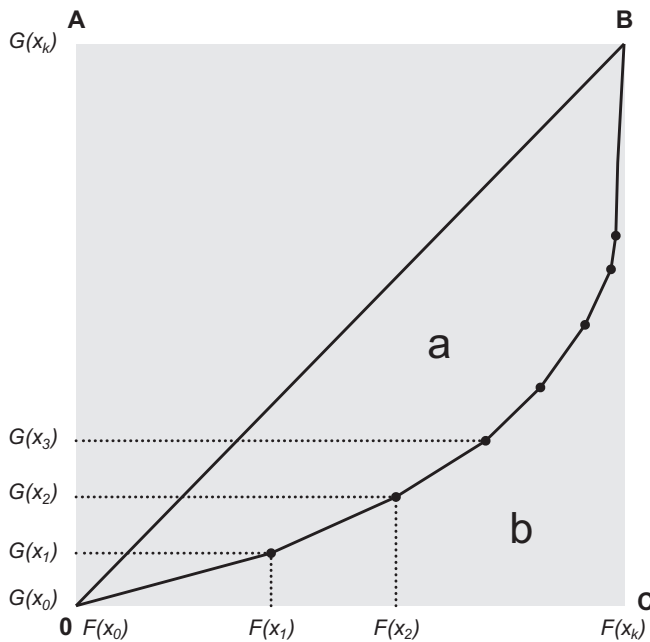


Ryc. 2. Pomiar koncentracji zbioru 8 obiektów wykonany wzorem Giniego. Brak reakcji wskaźnika na zmianę rozmieszczenia obiektów w obrębie jednostki podstawowej. $G_A = G_B = 0$

Źródło: B. Kostrubiec (1977), zmodyfikowane przez autora.

Measurement of concentration in a set consisting of 8 objects, using the Gini equation. There is a lack of response of the indicator to the change in the spatial arrangement of objects within the basic unit. $G_A = G_B = 0$

Source: B. Kostrubiec (1977), as modified by the author.



Ryc. 3. Wielobok koncentracji – krzywa Lorena

$F(x)$, $G(x)$ – kumulowane szeregi uporządkowane według malejących mas i pól, OB – prosta równomiernego podziału, a – pole koncentracji.

Źródło: B. Kostrubiec (1972), zmodyfikowane przez autora.

Polygon of concentration – the Lorenz curve

$F(x)$, $G(x)$ – cumulative ranks ordered by decreasing masses and fields, OB – equitable distribution line, a – field of concentration.

Source: B. Kostrubiec (1972), as modified by the author.

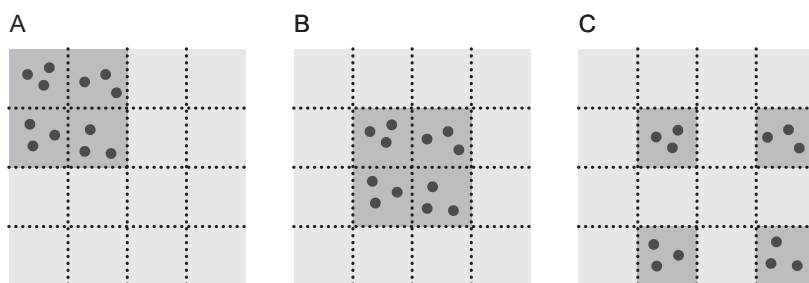
tracji pokrywa się z linią równomiernego rozdziału, która stanowi przekątną kwadratu – wieloboku koncentracji. Wówczas wartość współczynnika $G=0$. Jest to sytuacja pełnej równomierności rozkładu (skrajnej dekoncentracji). Odwrotna sytuacja to skrajna koncentracja – krańcowa nierównomierność. Wówczas krzywa koncentracji ma jeden skok, dla wartości $G = 1$. Ogólny, uproszczony wzór określający liczbowo wartość wskaźnika koncentracji w odniesieniu do wykresu wyraża się ilorazem:

$$G = \frac{a}{a + b}$$

dla $0 < G < 1$, gdzie a oznacza pole koncentracji zawarte pomiędzy krzywą koncentracji a linią równomiernego podziału (przekątną kwadratu), natomiast b jest to pole dopełnienia tego obszaru do trójkąta ($a + b$ stanowią pole połowy kwadratu). Pole koncentracji a uwidacznia w sposób plastyczny zjawisko koncentracji. Warto zauważyć również, że $G = 2a$. Współczynnik Giniego przyjmuje wartości z przedziału $[0; 1]$, często jednak wyraża się go w procentach.

Metoda jest przydatna do analizy rozmieszczenia zjawisk w odniesieniu do jednostek terytorialnych, jednak ma cechy utrudniające bezpośrednią interpretację wyników. Uwzględnienie wyłącznie stosunków powierzchni pól a i b , wyrażonych współczynnikiem, nie jest wystarczające do celów porównań. Dwie krzywe o różnym kształcie mogą mieć bowiem wskaźnik G o tej samej wartości, mimo że odnoszą się do terenów, na których obiekty są w różnym stopniu skoncentrowane. Na przykład, jedna krzywa może mieć wyrzuszenie blisko górnego, prawego rogu kwadratu, a druga, blisko lewego, dolnego rogu. Rozwiązaniem tego problemu jest interpretacja wizualna wiązki krzywych koncentracji, a nie tylko zbioru wskaźników (Kostrubiec, 1972). Z drugiej strony, niemal identyczne krzywe koncentracji mogą przedstawiać różne układy przestrzenne (Golachowski i inni, 1974). Pomimo że krzywa Lorenza operuje na danych opisujących rozmieszczenie zjawiska w jednostkach przestrzennych, nie bierze pod uwagę relacji położenia tych jednostek względem siebie, ani też względem centrum badanego układu (ryc. 4) (Arbia i inni, 2015). Dlatego można spotkać się z opinią, że współczynnik Giniego jest *de facto* wskaźnikiem aprzestrzennym (Stępniaik, 2014).

W związku z powyższym ograniczeniem, konieczne jest uzupełnienie prezentacji danych za pomocą mapy terenu, na której naniesione są skumulowane udziały badanego zjawiska w obrębie jednostek wybranego podziału terytorialnego. Mapa przedstawia w układzie przestrzennym progi poszczególnych udziałów zjawiska, wskazując np. jaki procent zabudowań na całym obszarze skupiony jest na określonej przestrzeni. Pełną interpretację zjawiska koncentracji przestrzennej umożliwia zatem trojaka metoda prezentacji: wskaźnik Giniego, krzywa Lorenza i mapa z udziałami zjawiska. Wielkość i kształt wybranych jednostek podziału terytorialnego wywiera wpływ na rezultaty analizy i wartość współczynnika koncentracji (ryc. 5). O. Duncan i inni (1961) wykazali, że wartość



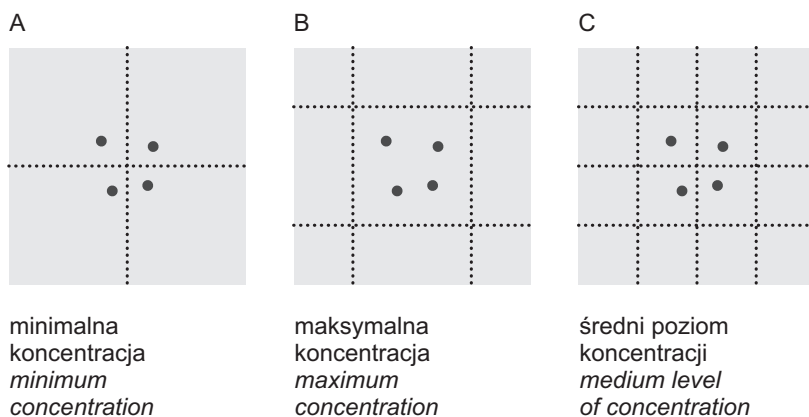
Ryc. 4. Pomiar koncentracji zbioru obiektów wykonany wzorem Giniego w odniesieniu do jednostek terytorialnych. Brak reakcji wskaźnika na zmianę rozmieszczenia jednostek podstawowych. $G_A = G_B = G_C$.

Opracowanie własne, na podstawie: G. Arbia i inni (2015).

Measurement of concentration of a set of objects, using the Gini equation, with respect to the territorial units. There is a lack of response of the indicator to the change in the spatial arrangement of the basic units. $G_A = G_B = G_C$.

Author's own elaboration, based on: G. Arbia *et al.* (2015).

wskaźnika jest tym większa, im bardziej szczegółowego podziału terytorialnego dotyczy (im mniejsza jest przeciętna wielkość jednostki przestrzennej). Ponadto istotny jest przebieg granic jednostek dzielących cały obszar. Jest to przykład występowania problemu zmiennej jednostki odniesienia (MAUP).



Ryc. 5. Występowanie problemu MAUP w odniesieniu do stałego rozkładu przestrzennego punktów. Rysunki A i B ilustrują problem wyznaczenia granic. Rysunki B i C ilustrują problem doboru skali jednostek.

Źródło: C. Haedo, M. Mouchart (2011), zmodyfikowane przez autora.

Occurrence of the modifiable areal unit problem (MAUP) with reference to an unchanged spatial distribution of points. Drawings A and B illustrate the problem of boundary delimitation. Drawings B and C illustrate the problem of choice of unit scale.

Source: C. Haedo, M. Mouchart (2011), as modified by the author.

Współczynnik Giniego znalazł liczne zastosowania w badaniach geograficznych w skali krajowej i regionalnej, dotyczących np. zmian struktury użytkowania ziemi (Song i inni, 2010), koncentracji obiektów przemysłowych (Alonso-Villar, 2011). Ma jednak ograniczoną wartość informacyjną przy badaniu zjawiska *urban sprawl* w skali szczegółowej, ponieważ pomiar nie uwzględnia dokładnych lokalizacji obiektów, aczkolwiek wadę tę ma każda metoda, w której przyjmuje się szczegółowość obliczeń ograniczoną do skali jednostki podstawowej.

Wskaźnik może wskazywać na skupienie (bądź rozproszenie) osadnictwa w układzie jednostek terytorialnych, którymi mogą być np. gminy otaczające dużą metropolię. Krzywa Lorenza pokazuje wówczas skumulowaną, względną, koncentrację zabudowy w obrębie całego obszaru, którą można porównać z krzywymi dla innych aglomeracji. Porównanie przebiegu kilku krzywych na jednym wykresie pozwala wnioskować o przebiegu procesów koncentracji i dekoncentracji osadniczej. Więcej informacji można odczytać z mapy terenu ze skumulowanymi udziałami zjawiska w gminach.

Wskaźnik koncentracji przestrzennej C

Wskaźnik koncentracji przestrzennej C zaproponowany przez B. Kostrubca (1972) bazuje na rozumieniu koncentracji jako „miary statystycznej, za pomocą której bada się stopień skupienia bądź rozproszenia elementów pewnego zbioru”. Maksymalna koncentracja wymaga skupienia wszystkich obiektów w jednym punkcie. Maksymalne rozproszenie oznacza maksymalny rozstęp między obiektami możliwy do uzyskania w ramach danego obszaru. Wskaźnik interpretuje losowe rozmieszczenie nie jako cechę wskazującą na rozproszenie układu – w sensie braku regularności (jednostajności), ale jako jedno z pośrednich stadiów pomiędzy skupieniem a dekoncentracją, a zatem spotykają się tutaj dwa podejścia – badanie rozproszenia i losowości układu punktów.

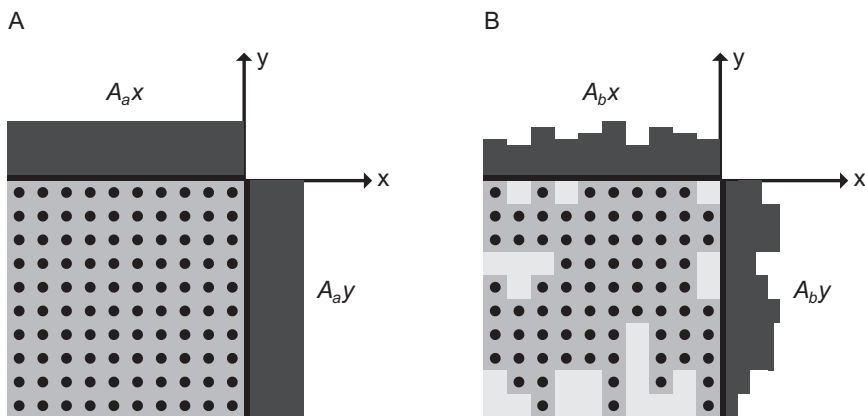
Za pomocą współczynnika Kostrubca można zmierzyć koncentrację ustalonej konfiguracji punktów materialnych rozrzuconych na płaszczyźnie. W celu jego wyznaczenia „chmurę punktów” (np. centroidy budynków) wpisuje się w prostokąt opisujący całość badanego obszaru, który następnie pokrywa się siatką kwadratów. Oblicza się liczbę punktów poziomo w wierszach i pionowo w kolumnach, a otrzymane sumy brzegowe jako szeregi statystyczne poddaje się dalszej analizie. Ogólny, uproszczony wzór przyjmuje postać:

$$C = \frac{1}{S_{x^2} + S_{y^2}}$$

Jest to odwrotność sumy wariancji rozkładów masy brzegowej dla każdego szeregu statystycznego (S_{x^2} i S_{y^2}). Wyprowadzenie wzoru zawiera praca B. Kostrubca (1972).

Wskaźnik przyjmuje wartości z przedziału $(0; \infty)$, może być też doprowadzony do postaci znormalizowanej, z wartościami należącymi do domkniętego przedziału $(0 \leq C \leq 1)$. Współczynnik jest tym wyższy, im większa jest koncentracja, a w miarę oddalania się obiektów od siebie jego wartość zbliża się do zera. Na podstawie wartości miernika można określić kierunek odchylenia od regularnego rozmieszczenia punktów, zmierzający do ich aglomeracji w jedno lub więcej skupisk albo do losowego rozmieszczenia. Wartość wskaźnika jest zależna od liczby punktów i od zmiany ich położenia. B. Kostrubiec (1972) przedstawił relację wzrostu lub osłabienia koncentracji w zależności od lokalizacji nowych punktów względem okręgu, mającego parametry określone specjalnym równaniem, otaczającego zbiór punktów istniejących. Ustalając tą metodą okrąg dla wybranej aglomeracji miejskiej można wyznaczyć region koncentracji osadniczej.

Rozkłady brzegowe zjawiska, uzyskane z mapy, przedstawione w postaci szeregów statystycznych – histogramów, pozwalają na wyznaczenie dodatkowych parametrów (np. średnia, wariancja i odchylenie standardowe, współczynniki asymetrii) (Kostrubiec, 1972; Jażdżewska, 1999). Porównanie rozkładów brzegowych z jednostajnym rozkładem przestrzennym, opisującym najbardziej rozproszoną formę rozrzutu obiektów na płaszczyźnie, umożliwia geograficzną interpretację zjawiska. Histogram rozkładu przestrzennego uzależniony jest od kształtu obszaru, co jest szczególnie wyraźne dla terenów o nieregularnych lub nieforemnych kształtach (ryc. 6).



Ryc. 6. Wpływ kształtu jednostki przestrzennej na postać rozkładów brzegowych (unormowane rozkłady brzegowe jednorodnie rozłożonej populacji: A – dla prostokątnej jednostki przestrzennej, B – dla nieregularnej jednostki przestrzennej).

Źródło: B. Kostrubiec (1977), zmodyfikowane przez autora.

The influence of the shape of a spatial unit on the form of marginal distributions (normalised marginal distributions of a uniformly distributed population: A – for a rectangular spatial unit, B – for an irregular spatial unit).

Source: B. Kostrubiec (1977), as modified by the author.

Wskaźnik koncentracji C jest określany przez samego autora (Kostrubiec, 1977) jako „metoda pomiaru koncentracji z uwzględnieniem lokalizacji obiektów”. W rzeczywistości dokładność pomiaru nie jest ograniczona narzuconym podziałem terytorialnym, chociaż jest limitowana wielkością oczka siatki kwadratów, na kanwie której prowadzi się analizę. Dobór wielkości oczka siatki wpływa również na kształt histogramów (szerokość słupków) i dokładność analizy rozkładu statystycznego cechy.

Współczynnik koncentracji przestrzennej C został użyty przez B. Kostrubca do badania koncentracji ludności (1974), poza tym był stosowany do badania mikrostruktury jednostek osadniczych (Chilczuk, 1975; Jażdżewska, 1999). Ogółem badań z wykorzystaniem tego miernika jest niewiele, w zasadzie tylko w literaturze krajowej, a szkoda, gdyż wskaźnik ten ma dużą wartość aplikacyjną, związaną również z badaniem zjawiska *urban sprawl* i rozproszenia zabudowy.

Wskaźnik pozwala na określenie, czy osadnictwo stanowi jedno lub więcej skupisk, czy też jest rozproszone. Wzrost liczby punktów wpływa w różny sposób na wartość wskaźnika, zależnie od ich lokalizacji. Wypełnianie luk w zabudowie istniejącej lub jej powstawanie poza obszarem zwartej zabudowy, ale w określonej niewielkiej odległości, zwiększa wartość wskaźnika. Z kolei powstawanie obiektów na większych dystansach powoduje osłabienie koncentracji. Wiele informacji uzyskać można poprzez nałożenie wykresów histogramów rozkładów brzegowych dla jednego obszaru, uzyskanych w różnych przedziałach czasowych. Wyznaczenie okręgu określającego region koncentracji osadniczej stanowić może teoretyczną podstawę delimitacji powierzchni, na której można wprowadzić dogęszczanie zabudowy, bądź przeciwnie – tej, której zgodnie z polityką deglomeracji nie powinno się zabudowywać, aby zapobiec nadmiernej intensywności zagospodarowania terenu.

Metoda najbliższego sąsiada (indeks Clarka-Evansa)

Metoda najbliższego sąsiada (ang. *average nearest neighbour, mean nearest neighbour*) została po raz pierwszy zastosowana w badaniach ekologicznych i biogeograficznych przez P.J. Clarka i F.C. Evansa (1954), a wkrótce również w geografii osadnictwa i ludności. Podstawowym założeniem jest pomiar uśrednionej odległości pomiędzy każdym z elementów zbioru a najbliższym elementem sąsiadującym. Skonstruowany wskaźnik pozwala określić odchylenie rozkładu przestrzennego obiektów (np. rozrzutu zabudowań na danym obszarze) od teoretycznego, losowego rozrzutu punktów na płaszczyźnie, zgodnego z prawem rozkładu Gaussa. Priorytetem przy jego obliczaniu jest nie tyle sama koncentracja, ile porównanie rozrzutu do losowego układu.

Wskaźnik wyrażony jest jako iloraz obserwowanej średniej odległości do spodziewanej odległości w przypadku hipotetycznego rozkładu losowego i wyraża się wzorem:

$$R = \frac{\bar{D}_O}{\bar{D}_E}$$

gdzie \bar{D}_O jest to obserwowana średnia wartość odległości, wyliczona z uwzględnieniem dystansu między każdym obiektem a jego najbliższym sąsiadem, natomiast \bar{D}_E – to spodziewana średnia wartość odległości.

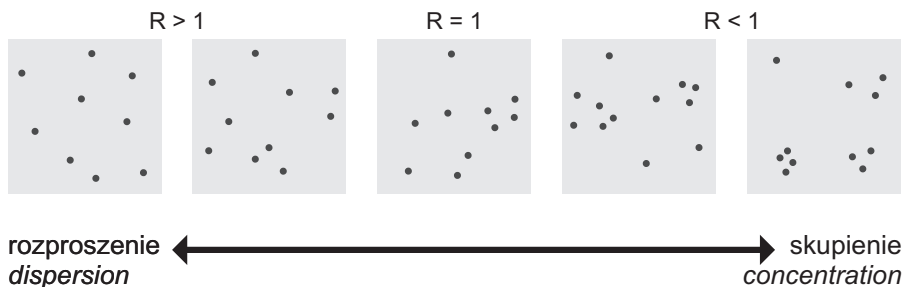
$$\bar{D}_O = \frac{\sum_{i=1}^n d_i}{n}$$

$$\bar{D}_E = \frac{0,5}{\sqrt{\frac{n}{A}}}$$

W powyższych wzorach d_i stanowi odległość między obiektem i a najbliższym obiektem, n oznacza całkowitą liczbę obiektów, natomiast A jest to całkowita powierzchnia obszaru.

Układ przestrzenny całkowicie losowy występuje gdy $R = 1$. Wartość mierzniaka $R < 1$ wskazuje na układ przestrzenny o charakterze klastrowym – występowanie skupień, wartość $R > 1$ – na trend w kierunku rozproszenia (ryc. 7). Maksymalne skupienie występuje wtedy, gdy wszystkie punkty osadnicze skupiają się w jednym miejscu, wówczas $R = 0$, maksymalne rozproszenie występuje przy regularnym rozmieszczeniu punktów w układzie heksagonalnym, wówczas $R = 2,1491$.

Wyliczenie dodatkowych parametrów statystycznych – odchylenia standardowego (z) i granicznych poziomów istotności (p), w odniesieniu do rozkładu normalnego, pozwala zbadać rozkład wartości odchylenia odległości „najbliższych



Ryc. 7. Wartości wskaźnika rozproszenia i skupienia – metoda najbliższego sąsiada

Opracowanie własne, na podstawie: desktop.arcgis.com.

Values of the dispersion and concentration indicator – average nearest neighbour method

Author's own elaboration, based on: desktop.arcgis.com.

sąsiadów” względem średniej, a także przetestować i stwierdzić statystyczną istotność otrzymanych wyników. Przyjmuje się hipotezę zerową, że obserwowany rozkład jest dziełem przypadku. Rzeczywisty układ przestrzenny może mieć cechy rozkładu „znaczącego” – równomiernego bądź skupiskowego, wskazując na działanie sił przyciągających bądź odpychających, które wpływają na lokalizacje obiektów (Ebdon, 1985; Mitchell, 2005).

Wskaźnik uwzględnia dokładne lokalizacje obiektów w ramach układu i dostarcza informację o rozproszeniu bądź koncentracji punktów w całym obszarze badania. Walorem metody jest uwolnienie badacza od konieczności stosowania siatki kwadratów, ponieważ pomiar dotyczy bezpośrednio rozstawienia punktów, w obrębie najbliższego sąsiedztwa. Występuje jednak znaczna wrażliwość wartości wskaźnika na zmiany wielkości obszaru badań – granice obszaru mają istotny wpływ na uzyskany wynik i najlepiej, jeżeli nie są to obszary zbyt małe (Kostrubiec, 1971). Najlepsze wyniki dają analizy porównawcze dla niezmienniej wielkości obszaru.

Ograniczeniem jest uwzględnianie przy obliczeniach jedynie odległości pomiędzy dwoma najbliższymi sąsiadami, co nie pozwala wychwycić innych zależności przestrzennych w zbiorze, np. występowania bliskiego regularności układu par punktów, przypominającego „tancerzy na parkiecie”. W przypadku takiej konfiguracji, przy wartości wskaźnika zbliżonej do $R = 0$, może się wydawać, że mamy do czynienia z siecią zaglomerowaną, tymczasem jest inaczej. Istnieją jednak modyfikacje metody, pozwalające na analizę trzech i więcej, kolejnych najbliższych sąsiadów (ang. *higher-order neighbour distances*). Za pomocą tej procedury teoretycznie można obliczyć parametry rozkładu odległości dowolnego rzędu, w praktyce przyjmowane są odległości najwyżej szóstego rzędu. Otrzymane średnie odległości porównuje się do przeciętnych odległości losowego rozrzutu ustalonej liczby punktów na tej samej powierzchni (Dacey, 1962; Boots i Getis, 1988).

Dla uzyskania wiarygodnych wyników metoda często wymaga uwzględnienia również „najbliższych sąsiadów” położonych poza granicami obszaru badań. Analiza wykonana z tego rodzaju korektą pozwala na zniwelowanie wpływu na wyniki tzw. „efektu krawędzi” (ang. *edge effect*). Istnieją cztery metody kompensacji efektu krawędzi – otoczenie obszaru badań o regularnym kształcie przez identyczny układ punktów, zignorowanie punktów położonych bliżej w stosunku do krawędzi niż do innych punktów, wyłączenie zewnętrznej strefy buforowej z obszaru badań i dodanie stałego wskaźnika korekcyjnego do wyniku równania (Donnelly, 1978; Boots i Getis, 1988).

Mankamentem wskaźnika jest, w przypadku analizy układów punktowych, nieuwzględnienie wielkości (rozmiarów) jednostki osadniczej. Modyfikacja wskaźnika w odniesieniu do jednostek przedstawianych powierzchniowo, w postaci płatów zabudowy (analogicznych do płatów krajobrazu), umożliwia analizę relacji sąsiedztwa między najbliższymi punktami położonymi na kra-

wędziach jednostek osadniczych. Miarę tę określa się podobnie, jako „wskaźnik uśrednionej odległości do najbliższego sąsiada” (ang. *mean nearest-neighbour distance*); inne, pochodne metryki przestrzenne to: „odchylenie standardowe najbliższego sąsiada” (ang. *nearest-neighbour standard deviation*), „współczynnik zmienności najbliższego sąsiada” (ang. *nearest-neighbour coefficient of variance*) (McGarigal i Marks, 1995).

Metoda najbliższego sąsiada już w latach 1960. była aplikowana do badania arbitralności rozmieszczenia mieszkańców w obrębie granic miejskich (Dacey, 1962), losowości rozmieszczenia jednostek osadniczych (Curry, 1964), czy zmian rozmieszczenia obiektów handlowych (Getis, 1964), a bardziej współcześnie, m.in. w badaniach podmiejskich stref aktywności gospodarczej, *edge cities* (Lang i inni, 2006), lokalizacji wysokich budynków w kontekście rozwoju aglomeracji (Broitman i Czamanski, 2012), a także w analizie różnych przemian urbanizacyjnych, opartych na metrykach krajobrazowych (Aguilera i inni, 2011; Li i inni, 2013). Wskaźnik ten wykorzystana również w badaniach koncentracji miejskiej sieci osadniczej I. Jażdżewska (2008).

Zastosowanie indeksu Clarka-Evansa pozwala na uzyskanie informacji, czy rozkład przestrzenny jest zbliżony do równomiernego, czy nierównomierny, co np. w przypadku układu skupionego pozwala stwierdzić planowość działań inwestorów związanych z lokalizacją budynków, względnie istnienie sprzyjających warunków do lokalizacji zabudowy w określonych miejscach. W praktyce czynniki wiodące występują zawsze, ale niekiedy oddziaływanie wielu niezależnych przyczyn generuje układ sieci osadniczej zbliżony do wzorcowego rozkładu. Ta cecha metody najbliższego sąsiada wskazuje na jej przydatność do analizy procesów *urban sprawl*, szczególnie jeśli chodzi o identyfikację czynników lokalizacyjnych i kierunków przemian urbanizacyjnych.

Entropia Shannona

Entropia jest miarą probabilistyczną, wprowadzoną przez C.E. Shannona (1948), za pomocą której można określić stopień nieokreśloności badanych stanów czy też rozkładów zmiennych losowych; jest miarą „chaosu”, „nieuporządkowania” bądź „losowości”. Wysoka wartość wskaźnika entropii oznacza dużą niepewność niesionej informacji, jest najbardziej prawdopodobnym, ale najmniej przewidywalnym stanem, prowadzącym do nieuporządkowania w badanym układzie. Entropia Shannona ma postać funkcji logarytmicznej, której wartości zależą od prawdopodobieństw, jakie towarzyszą realizacji wartości dyskretnej zmiennej losowej; pozwala na określenie stopnia nierównomierności dyskretnego rozkładu prawdopodobieństwa (Wędrowska, 2010).

Entropia może być również ujmowana szerzej, jako miara segregacji lub integracji – w odniesieniu do zjawisk społecznych (Theil, 1967), bądź też miara koncentracji lub rozproszenia – w odniesieniu do zjawisk rozmieszczonych w prze-

strzeni geograficznej (Batty, 1974; Thomas, 1981). Wyraża wówczas nie rozkład prawdopodobieństwa, lecz proporcjonalność rozkładu samego zjawiska. Według zbliżonego ujęcia, entropia jest miarą organizacji przestrzennej obszaru – gdy jest zbyt wysoka, mamy do czynienia z chaotycznym rozwojem, niewłaściwą alokacją zasobów, jednak gdy jest zbyt mała, wówczas system (np. miasto) jest zbyt jednorodny i wrażliwy na zmiany (Cabral i inni, 2013).

W przypadku analizy prowadzonej w odniesieniu do przestrzeni geograficznej, entropię można przedstawić w następujący sposób (Thomas, 1981; Yeh i Li, 2001):

$$H_n = \sum_i^n p_i \log\left(\frac{1}{p_i}\right)$$

gdzie p_i jest proporcją udziału danego zjawiska (zmiennej) w jednostce przestrzennej i spośród n jednostek, określoną wzorem:

$$p_i = \frac{x_i}{\sum_i^n x_i}$$

gdzie x_i – to obserwowana wartość zjawiska (np. powierzchnia zabudowy lub liczba punktów osadniczych) w jednostce i .

Wartość entropii mieści się na skali od $H=0$, określającej maksymalną koncentrację zjawiska, wyłącznie w jednej jednostce przestrzennej (strefie) do maksymalnej wartości $H=\log n$, w przypadku maksymalnego rozproszenia zjawiska, wyrażonego poprzez jednakowy udział zmiennej w każdej ze stref ($p_i = \frac{1}{n}$). Możliwe jest również przeliczenie wyniku do entropii względnej, przyjmującej wartości z przedziału $[0; 1]$, za pomocą wzoru:

$$H_n^* = \frac{\sum_i^n p_i \log\left(\frac{1}{p_i}\right)}{\log n}$$

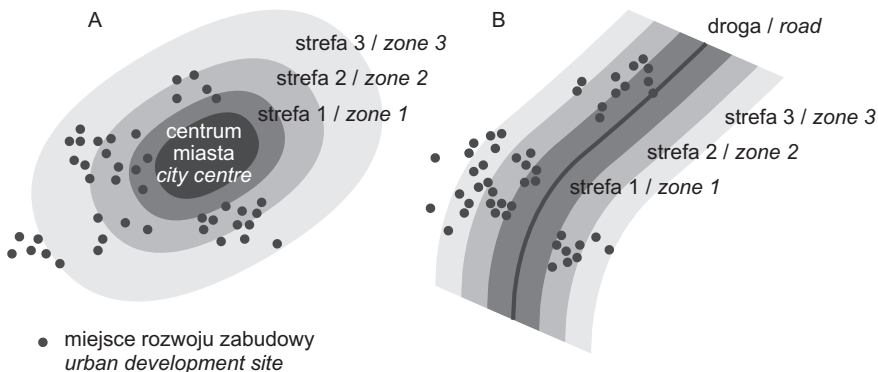
Entropia może być mierzona w odniesieniu do wybranych jednostek podziału terytorialnego, jak również w oczkach regularnej siatki kwadratów, lub innych regularnych strefach. Zmiana kształtów i wielkości jednostek podstawowych ma pewien wpływ na wartość wskaźnika entropii (problem *MAUP*). Na przykład, przy zmianie poziomu analizy ze skali regionu do skali subregionu otrzymujemy inną wartość entropii. Wpływ zmiany skali na entropię, przy zmianie szczegółowości podziału terytorialnego może być pomierzony za pomocą równania uwzględniającego proporcję udziału subregionów w obrębie regionów (Theil, 1967; Thomas, 1981). Entropia może być rozbita na dwie składowe: zróżnicowania pomiędzy regionami i zróżnicowania w obrębie regionów. Równanie wskazuje, że wzrost liczby stref (wraz ze zmniejszeniem wielkości strefy), powoduje

wzrost wartości entropii, ponieważ zyskuje się informację zebraną w obrębie mniejszych jednostek, np. subregionów.

Miarę entropii w układzie regularnej siatki zastosował J.V. Miedvedkov (1966) wyróżniając pięć podstawowych rozkładów, wynikających z rozmieszczenia punktów (sieć regularna, równowystępujących częstości, zaglomerowana, heterogeniczna, poissonowska). W przypadku, gdy opieramy analizę na regularnej siatce (o jednakowej wielkości kratki), albo innym układzie jednakowych jednostek podstawowych (np. stref buforowych o tej samej szerokości), wpływ zmiany skali, wyrażony wielkością tych stref jest dosyć przewidywalny. A.G. Yeh i X. Li (2001) wykazali, że entropia względna rozproszenia zabudowy dla różnych miast zmienia się w bardzo podobny sposób, przy jednakowej zmianie wielkości jednostek podstawowych.

Współcześnie wskaźnik entropii jest często wykorzystywany do analizy zmian pokrycia terenu i użytkowania ziemi na podstawie danych zapisanych w formacie rastrowym – wysokorozdzielczych zdjęć satelitarnych i lotniczych, czego przykładem są badania postępowania zjawiska *urban sprawl* względem centrów miast i tras komunikacyjnych, związane z rozpoznaniem zmian gęstości zagospodarowania terenu (Yeh i Li, 2001) (ryc. 8); interesująca jest również możliwość wyznaczenia entropii pionowej, określającej zróżnicowanie wysokości zabudowy (Verzosa i Gonzalez, 2010).

Monitoring procesów *urban sprawl* uwzględniający rozpoznanie zmian wskaźnika entropii Shannona pozwala na ocenę tempa rozprzestrzeniania się zabudowy. Jeżeli wartość entropii zwiększa się w czasie, oznacza to postępują-



Ryc. 8. Strefy koncentryczne wokół centrum miasta (A) i strefy buforowe równoległe do tras komunikacyjnych (B), pozwalające na określenie zagęszczenia zabudowy w ich obrębie

Źródło: A.G.O. Yeh, X. Li (2001), zmodyfikowane przez autora.

Concentric rings around a city centre (A) and buffer zones parallel to transport routes (B), allowing for recognition of the development density within them

Source: A.G.O. Yeh, X. Li (2001), as modified by the author.

ce rozpraszanie, odwrotna sytuacja – spadek entropii – oznacza, że następuje wypełnianie obszaru zabudową, zmniejszenie fragmentacji terenu i zwiększenie zwartości jednostki osadniczej. Można więc powiedzieć, że entropia stanowi miarę fragmentacji bądź wypełnienia terenu, a obliczenie maksymalnej entropii osadnictwa dla kilku jednostek czasu pozwala na określenie granic rozwoju przestrzennego obszaru. Z tego względu entropia Shannona jest przydatnym narzędziem do interpretacji zmian w zagospodarowaniu przestrzennym i do monitoringu zjawiska *urban sprawl*.

Podsumowanie i wnioski

Przeprowadzony przegląd wybranych metod wskaźnikowych służących do badania koncentracji przestrzennej osadnictwa potwierdza, że oparcie mierników na zróżnicowanych podstawach matematyczno-statystycznych, wiąże się z różnym rozumieniem tego pojęcia. W uproszczeniu powiedzieć można, że koncentracja wyznaczona jest przez: (1) skupienie bądź proporcjonalność udziału zjawiska w mniejszej lub większej liczbie jednostek przestrzennych – wskaźnik Giniego, entropia Shannona, lub też: (2) rozrzut zjawiska w obszarze badań, na skali między układem maksymalnie skupionym (w jednym punkcie), klastrowym (występowaniem skupień), losowym (nieregularnym) a maksymalnie rozproszonym (regularnym) – wskaźnik koncentracji *C* Kostrubca, metoda najbliższego sąsiada. W tym drugim przypadku występuje problem jednoczesnego badania dwóch wymiarów zjawiska – rozproszenia oraz losowości, przy czym ekstrema jednego z wymiarów mogą opisywać również ten drugi.

Zależnie od tego, w jaki sposób badacz definiuje osadnictwo skupione bądź rozproszone, ale także zależnie od skali badanego obszaru, liczby i sposobu rozmieszczenia jednostek osadniczych czy formy dostępnych danych przestrzennych, dobierać może najbardziej adekwatne metody pomiarowo-wskaźnikowe. Każdy ze wskaźników ma cechy predestynujące go do określonych zastosowań: wskaźnik Giniego – analiza skumulowanej koncentracji w układzie jednostek terytorialnych; wskaźnik *C* Kostrubca – szczegółowe rozpoznanie statystyk rozkładu przestrzennego zjawiska; metoda najbliższego sąsiada – badanie regularności lub losowości rozmieszczenia osadnictwa, stwierdzenie występowania sił wpływających na decyzje lokalizacyjne; entropia Shannona – określenie stopnia fragmentacji bądź wypełnienia terenu przez zabudowę, „nieuporządkowania” układu przestrzennego.

Na dobór wskaźników rzutuje zakładana wiarygodność i pewność uzyskiwanych wyników, związana między innymi z wpływem zmian granic badanego obszaru, a także wielkości i kształtu podstawowych jednostek przestrzennych na wynik pomiaru, co wiąże się z występowaniem problemu zmiennej jednostki odniesienia (MAUP). Problem dotyczy wszystkich analiz opartych na danych zagregowanych przestrzennie, ale może mieć bardziej lub mniej istotny wpływ

na wyniki (jeżeli i tak dochodzi się do tych samych wniosków). Wykazano, że problem ten jest istotny w przypadku współczynnika Giniego, występuje również w przypadku entropii Shannona, lecz wpływ ten można w dosyć jednoznaczny sposób pomierzyć. Dla wartości wskaźnika najbliższego sąsiada istotniejsze jest z kolei uwzględnienie tzw. „efektu krawędzi”.

Kolejnym zagadnieniem jest możliwość prezentacji wartości wskaźnika koncentracji przestrzennej nie tylko w postaci „suchych” danych liczbowych, ale również w formie wykresu (wiązki wykresów) lub mapy. Zastosowanie dodatkowych metod prezentacji może być niezbędne do prawidłowej interpretacji wyników analizy (wskaźnik Giniego), wzbogaca opis zjawiska koncentracji przestrzennej o dodatkowe miary rozkładu statystycznego (wskaźnik *C* Kostrubca), pozwala określić statystyczną istotność uzyskanych wyników (metoda najbliższego sąsiada). Wszystkie omówione powyżej zagadnienia zostały zestawione w tabeli 1.

Ponieważ interesuje nas zastosowanie miar koncentracji przestrzennej w badaniu procesów *urban sprawl*, należy zauważyć, że omawiane zjawisko wymaga w istocie wieloczynnikowego podejścia, uwzględnienia w syntetycznej formie różnych jego aspektów: zróżnicowania i zmian gęstości zaludnienia, lokalizacji miejsc pracy, dostępności komunikacyjnej, czy fizjonomii krajobrazu. Na przykład, R. Ewing i S. Hamidi (2014) proponują zagregowany wskaźnik *sprawl*, uwzględniający cztery dosyć złożone atrybuty: zagęszczenie rozwoju, przemieszczenie użytkowania ziemi, centralizację aktywności i dostępność drogową.

Skupiając się na ujęciu typowo fizjonomicznym, związanym ze strukturą osadnictwa, G. Galster i inni (2001) wyróżnili osiem „wymiarów” *urban sprawl*: koncentrację, gęstość, ciągłość, klasteryzację, centralizację, (mono-/poli-)nuklearność, mieszane użytkowanie i bliskość. Można zatem powiedzieć, że stopień koncentracji, czy raczej dekoncentracji przestrzennej zabudowy jest być może najbardziej rozpoznawalnym, ale jednocześnie tylko jednym z wielu wymiarów *sprawl*, który nie może sam przesądzać o występowaniu tego zjawiska.

Co więcej, dekoncentracja może być różnie rozumiana, w ujęciach statycznych i dynamicznych – jako określony, niski stopień skumulowanej koncentracji wyznaczonej wskaźnikiem Giniego, losowe lub równomierne rozmieszczenie zabudowy opisane metodą najbliższego sąsiada (indeksem Clarka-Evansa), bardziej jedностajny rozkład przestrzenny na podstawie wskaźnika *C* Kostrubca lub też wzrost wartości entropii Shannona. Każdy z wymienionych wskaźników opisuje też częściowo inne wymiary, np. indeks Clarka-Evansa wskazuje na stopień klasteryzacji, a entropia Shannona – ciągłość przestrzenną zagospodarowania.

Problem stanowi brak jednoznacznej definicji *urban sprawl* i ujmowanie tego zjawiska w kategoriach zarówno stanu zagospodarowania przestrzeni, jak i procesu o określonej dynamice. W związku z istniejącym chaosem pojęciowym, nie wydaje się możliwe precyzyjne określenie wartości progowych wskaźników, dla których zjawisko to występuje, bądź nie. Dotyczy to zarówno rozproszenia zabudowy, jak i innych aspektów charakteryzujących „żywiolową” bądź „niekon-

Tabela 1. Porównanie wskaźników koncentracji i rozproszenia osadnictwa (zabudowy)
Comparison of indicators of the concentration and dispersion of settlement

Wskaźnik <i>Indicator</i>	Współczynnik Giniego <i>Gini coefficient</i>	Wskaźnik C Kostrubca <i>C index of Kostrubiec</i>	Metoda najbliższego sąsiada <i>Average nearest neighbour</i>	Entropia Shannona <i>Shannon entropy</i>
Rodzaj miernika (własności matema- tyczne)	wskaźnik skumulowanej kon- centracji bazujący na krzywej Lorenza	odwrotność sumy wariancji rozkładów masy brzegowej określonej konfiguracji punk- tów na płaszczyźnie („chmury punktów”)	iloraz obserwowanej średniej odległości między każdym ele- mentem zbioru a jego najbliż- szym sąsiadem (ew. kolejnymi sąsiadami) do spodziewanej odległości dla hipotetycznego rozkładu losowego	miara probabilistyczna – stop- nia koncentracji rozkładu zmiennej losowej, ale również miara proporcji udziału war- tości zmiennej w jednostkach przestrzennych
Pojęcie (definicja) koncentracji	skupienie masy / liczności wystąpień punktów w ramach mniejszej lub większej liczby jednostek przestrzennych (względnie na mniejszej lub większej powierzchni)	miara statystyczna skupienia lub rozproszenia elementów zbioru: od skupienia w jednym punkcie do maksymalnego rozstępu w ramach obszaru; pozwala także wskazać na losowość układu	odchylenie rozkładu prze- strzennego obiektów od teore- tycznego, losowego rozrzutu punktów na płaszczyźnie (w kierunku rozkładu rozpro- szonego – regularnego lub rozkładu skupionego)	proporcja udziału zjawiska (liczba punktów, powierzchnia pokrycia) w odniesieniu do jednostek podziału terenu
Podstawowe jednost- ki przestrzenne (pola podstawowe wyznaczające dokład- ność pomiaru)	najczęściej jednostki wybrane- go podziału terytorialnego, np. administracyjnego; możliwa też siatka kwadratów i inne podziały (położenie punktów w obrębie pól podstawowych nie ma znaczenia)	oczka jednolitej siatki kwa- dratów pokrywającej badany obszar	wskaźnik uwzględnia dokładne lokalizacje punktów w obrę- bie badanego obszaru (bądź dokładne kształty jednostek osadniczych – dla wskaźnika uwzględniającego odległości między krawędziami)	dowolne: oczka jednolitej siat- ki (np. kwadratów), jednostki nieregularne (np. podziału administracyjnego), strefy koncentryczne, itp.

Uzupełniające metody prezentacji (wykres, mapa)	wielobok koncentracji – krzywa Lorenza, wskazująca szereg kumulacyjny udziału zjawiska; mapa przedstawiająca progi udziału zjawiska metodą kartogramu	mapa rozkładu przestrzennego zjawiska w siatce kwadratów, uzupełniona przez histogramy opisujące parametry rozkładów masy brzegowej (szeregi statystyczne)	wykres rozkładu normalnego, uwzględniający odchylenie standardowe (rozkład wartości odległości względem średniej) i prawdopodobieństwo testowe (określa statystyczną istotność wyników)	mapy entropii w układzie stref (jednostek podstawowych), wykresy entropii w zależności od odległości od centrum układu, wykresy porównawcze (zmian w czasie), itp.
Wpływ wielkości i kształtu jednostek oraz przebiegu granic obszaru na wynik pomiaru	rezultaty pomiaru zależne od kształtu, wielkości i liczby jednostek terytorialnych; modyfikacje wskaźnika biorą poprawkę na zmienność powierzchni jednostek (standaryzacja); miernik nie uwzględnia relacji wzajemnego położenia jednostek	kształt obszaru badań wpływa na wartość wskaźnika obliczanego dla minimalnego prostokąta opisującego obszar; dobór wielkości oczka siatki kwadratów ma wpływ na kształt histogramów	wskaźnik wykazuje dużą wrażliwość na zmiany wielkości obszaru badań; ponadto na wynik pomiaru wpływa „efekt krawędzi”, ale istnieją metody jego zniwelowania (zmiana granic, redukcja liczby punktów lub włączenie punktów położonych za granicą obszaru)	zmiana wielkości i kształtu jednostek podstawowych wpływa na wartość wskaźnika; wpływ zmiany skali regularnych jednostek na wynik jest dosyć przewidywalny; możliwe pomierzenie wpływu zmiany szczegółowości podziału terytorialnego (jednostki nieregularne) na wartość wskaźnika
Przykładowe zastosowania w badaniach rozpraszania zabudowy / <i>urban spraw</i>	pokazanie skumulowanej koncentracji osadnictwa w układzie jednostek terytorialnych (metropolia – gminy ościenne) lub w innych podziałach, ocena zmian struktury procentowej typów użytkowania ziemi	analiza mikro- i makrostruktury sieci osadniczej oraz dynamiki przyrostu zabudowy i jej cech (rozpraszanie osadnictwa, dogęszczanie zabudowy)	dostarczenie informacji o losowości bądź regularności rozmieszczenia budynków lub jednostek osadniczych, stwierdzenie działania sił i zależności przestrzennych sprzyjających określonym lokalizacjom inwestycji	wskaźnik wskazuje na stopień fragmentacji lub wypełnienia terenu zabudową; jest stosowany do badania dynamiki koncentracji lub rozpraszania osadnictwa

trolowaną” suburbanizację. Czy obserwowany wzorzec rozproszonej zabudowy można określić mianem *sprawl*, zależy wyłącznie od kryteriów i metodyki przyjętej przez badacza.

Zdaniem autora najbardziej wszechstronną ocenę badanego zjawiska umożliwia dobranie kilku metod i równoległa analiza przeprowadzona za ich pomocą. Pozwala to na otrzymanie komplementarnych wyników, wskazujących na odmienne informacje odnoszące się do skupienia i dekoncentracji zabudowy na danym terenie. Zaprezentowany przegląd wskaźników będzie stanowić podstawę metodyczną do prowadzenia przez autora prac empirycznych w tym zakresie, odnoszących się do procesów koncentracji i rozpraszania zabudowy w aglomeracji warszawskiej po 1989 roku.

Piśmiennictwo / References

- Aguilera F., Valenzuela L.M., Botequilha-Leitao A., 2011, *Landscape metrics in the analysis of urban land use patterns: A case study in a Spanish metropolitan area*, *Landscape and Urban Planning*, 99, 3, s. 226-238.
- Alonso-Villar O., 2011, *Measuring concentration: Lorenz curves and their decompositions*, *The Annals of Regional Science*, 47, 2, s. 451-475.
- Arbia G., Espa G., Giuliani D., 2015, *Analysis of spatial concentration and dispersion* [w:] C. Karlsson, M. Andersson, T. Norman (red.), *Handbook of Research Methods and Applications in Economic Geography*, Edward Elgar Publishing, Cheltenham, s. 135-157.
- Batty M., 1974, *Spatial entropy*, *Geographical Analysis*, 6, 1, s. 1-31.
- Batty M., Chin N., Besussi E., 2002, *State of the Art Review of Urban Sprawl Impacts and Measurement Techniques. Deliverable Report D1*, SCATTER, European Commission, www.casa.ucl.ac.uk/scatter/download/Scatter_D1.pdf (5.03.2016)
- Boots B., Getis A., 1988, *Point Pattern Analysis*, Sage University Paper Series on Quantitative Applications in the Social Sciences, series 07-001, Sage Publications.
- Broitman D., Czamanski D., 2012, *Cities in competition, characteristic time, and leapfrogging developers*, *Environment and Planning B: Planning and Design*, 39, 6, s. 1105-1118.
- Cabral P., Augusto G., Tewolde M., Araya Y., 2013, *Entropy in urban systems*, *Entropy*, 15, 12, s. 5223-5236.
- Carruthers J. I., Ulfarsson G. F., 2003, *Urban sprawl and the cost of public services*, *Environment and Planning B*, 30, 4, s. 503-522.
- Chilczuk M., 1975, *Osadnictwo wiejskie: metody badań koncentracji zabudowy i kształtów wsi*, PWN, Warszawa.
- Chin N., 2002, *Unearthing the roots of urban sprawl: a critical analysis of form, function and methodology*, CASA Working Papers 47, Centre for Advanced Spatial Analysis (UCL), London.
- Chojnicki Z., Czyż T., 1989, *Charakterystyka małych miast regionu poznańskiego a koncepcja kontinuum miejsko-wiejskiego* [w:] P. Korcelli, A. Gawryszewski (red.), *Współczesne przemiany regionalne systemów osadniczych w Polsce*, *Prace Geograficzne, IGiPZ PAN*, 152, Warszawa, s. 139-157.

- Clark P.J., Evans F.C., 1954, *Distance to nearest neighbor as a measure of spatial relationships in population*, Ecology, 35, 4, s. 445-453.
- Colby C., 1933, *Centrifugal and centripetal forces in urban geography*, Annals of the Association of American Geographers, 23, s. 1-20.
- Curry L., 1964, *The random economy: An exploration in settlement theory*, Annals of the Association of American Geographers, 54, s. 138-146.
- Dacey M.F., 1962, *Analysis of central place and point patterns by nearest neighbour method*, Land Studies in Geography, Ser. B, 24, s. 55-75.
- Dieleman F., Wegener M., 2004, *Compact city and urban sprawl*, Built Environment, 30, 4, s. 308-323.
- Donnelly K.P., 1978, *Simulations to determine the variance and edge effect of total nearest neighbour distance*, [w:] I. Hodder (red.), *Simulation Methods in Archaeology*, Cambridge University Press, s. 91-95.
- Duncan O.D., Cuzzort R.P., Duncan B., 1961, *Statistical Geography: Problems in Analyzing Areal Data*, Free Press (Macmillan), New York.
- Dziewoński K., 1987, *Strefa podmiejska – próba ujęcia teoretycznego*, Przegląd Geograficzny, 59, 1-2, s. 55-63.
- Ebdon D., 1985, *Statistics in Geography*, Blackwell, Oxford, 2 wyd.
- Ewing R., 1997, *Is Los Angeles-style sprawl desirable?*, Journal of the American Planning Association, 63, 1, s. 107-126.
- Ewing R., Hamidi S., 2014, *Measuring Sprawl 2014*, Smarth Growth America.
- Franz G., Maier G., Schröck P., 2006, *Urban Sprawl – How Useful is this Concept?*, ERSA Conference Papers, 105, European Regional Science Association.
- Frenkel A., Orenstein D., 2011, *A pluralistic approach to defining and measuring urban sprawl*, [w:] X. Yang (red.), *Urban Remote Sensing: Monitoring, Synthesis and Modeling in the Urban Environment*, Wiley-Blackwell, Chichester.
- Galster G., Hanson R., Ratcliffe M., Wolman H., Coleman S., Freihage J., 2001, *Wrestling Sprawl to the Ground: Defining and measuring an elusive concept*, Housing Policy Debate, 12, 4, s. 681-717.
- Gehlke C. E., Biehl K., 1934, *Certain effects of grouping upon the size of the correlation coefficient in census tract material*, Journal of the American Statistical Association, 29, 185A, s. 169-170.
- Getis A., 1964, *Temporal analysis of land use patterns with the use of nearest neighbor and quadrat methods*, Annals of the Association of American Geographers, 54, s. 391-399.
- Ghani N.L.A., Abidin S.Z., Khalid N.E.A., 2014, *Urban sprawl shape description*, Malaysian Journal of Computing, 2, 1, s. 27-36.
- Gini C., 1912, *Variabilità e mutabilità*, Studi economico-giuridici pubblicati per cura della Facoltà di Giurisprudenza della Regia Università di Cagliari, Anno III, parte 2.
- Golachowski S., Kostrubiec B., Zagożdżon A., 1974, *Metody badań geograficzno-osadniczych*, PWN, Warszawa.
- Haedo C., Mouchart M., 2011, *A Stochastic Independence Approach for Different Measures of Global Specialization*, Institut de Statistique, Biostatistique et Sciences Actuarielles (ISBA), Discussion Paper 2011/06, Université catholique de Louvain.
- Jażdżewska I., 1999, *Przemiany funkcjonalne i morfologiczne przestrzeni geograficznej wsi Rzgów w świetle metod numerycznych*, Szlakami Nauki, 28, Łódzkie Towarzystwo Naukowe, Łódź.
- Jażdżewska I., 2008, *Przemiany miejskiej sieci osadniczej w Polsce w świetle metod matematycznych*, Wydawnictwo Uniwersytetu Łódzkiego, Łódź.

- Kostrubiec B., 1971, *Analiza matematyczna zbioru osiedli województwa opolskiego*, [w:] S. Golachowski (red.), *Struktury i procesy osadnicze*, Instytut Śląski, Opole-Wrocław.
- Kostrubiec B., 1972, *Analiza zjawisk koncentracji w sieci osadniczej – problemy metodyczne*, Prace Geograficzne, IG PAN, 93, Warszawa.
- Kostrubiec B., 1977, *Metody badania koncentracji przestrzennej*, [w:] Z. Chojnicki (red.), *Metody ilościowe i modele w geografii*, PWN, Warszawa, s. 63-76.
- Kwan M-P., Weber J., 2008, *Scale and accessibility: Implications for the analysis of land use–travel interaction*, *Applied Geography*, 28, s. 110-123.
- Lang R., Sanchez T., LeFurgy J., 2006, *Beyond Edgeless Cities: Office Geography in the New Metropolis*, Virginia Tech, National Center for Real Estate Research, Blacksburg.
- Li C., Li J., Wu J., 2013, *Quantifying the speed, growth modes, and landscape pattern changes of urbanization: a hierarchical patch dynamics approach*, *Landscape Ecology*, 28, s. 1875-1888.
- Lisowski A., Grochowski M., 2009, *Procesy suburbanizacji. Uwarunkowania, formy, konsekwencje*, [w:] *Ekspertyzy do Koncepcji Przestrzennego Zagospodarowania Kraju 2008-2033*, 1, Ministerstwo Rozwoju Regionalnego, Warszawa, s. 221-280.
- Lorenz M.O., 1905, *Methods of measuring the concentration of wealth*, *Publications of the American Statistical Association*, 9, 70, s. 209-219.
- Majid M.R., Yahya H., 2010, *Sprawling of a Malaysian city: What type and what solutions?*, [w:] J.G. Teng (red.), *Proceedings of the First International Conference on Sustainable Urbanization (ICSU 2010), 15-17 XII 2010 Hong Kong*, Hong Kong Polytechnic University.
- McGarigal K., Marks B.J., 1995, *FRAGSTATS. Spatial pattern analysis program for quantifying landscape structure*, General Technical Report PNW-GTR-351, US Department of Agriculture, Forest Service, Pacific Northwest Research Station.
- McKenzie R.D., 1926, *The Scope of Human Ecology*, 20th Annual Meeting, 1925, Paper and Proceedings, 20, American Sociological Society, Washington D.C., s. 141-154.
- Miedvedkov J.V., 1966, *Regularnaja komponenta v sietach rassielenija izobrazennykh na kartie*, *Izvestia AN SSSR, Seria Geografičeskaja*, 4, s. 110-122.
- Mitchell A., 2005, *The ESRI Guide to GIS Analysis*, 2, ESRI Press, Redlands, CA.
- Openshaw S., 1983, *The Modifiable Areal Unit Problem*, Geo Books, Norwich, UK.
- Shannon C.E., 1948, *A mathematical theory of communication*, *Bell System Technical Journal*, 27, s. 379-423, 623-656.
- Song Y., Qiu Q., Guo Q., Lin J., Li F., Yu Y., Li X., Tang L., 2010, *The application of spatial Lorenz curve (SLC) and Gini coefficient in measuring land use structure change*, [w:] *The 18th International Conference on Geoinformatics: GIScience in Change, 18-20 VI 2010*, Beijing University, Beijing, s. 1-5.
- Soule D.C. (red.), 2006, *Urban Sprawl – a Comprehensive Reference Guide*, Greenwood Press, London.
- Squires G.D. (red.), 2002, *Urban Sprawl: Causes, Consequences and Policy Responses*, Urban Institute Press, Washington D.C.
- Steinhaus H., 1947, *O wskaźniku zagęszczenia i rozproszenia*, *Przegląd Geograficzny*, 21, 1-2, s. 1-3.
- Stępiak M., 2014, *Przekształcenia przestrzennego rozmieszczenia zasobów mieszkaniowych w Warszawie w latach 1945-2008*, Prace Geograficzne, IGiPZ PAN, 245, Warszawa.
- Straszewicz L., 1985, *Strefa podmiejska. Pojęcia i definicje*, *Folia Geographica*, 5, Acta Universitatis Lodziensis, s. 7-16.

- Szmytkie R., 2014, *Metody analizy morfologii i fizjonomii jednostek osadniczych*, Rozprawy Naukowe Instytutu Geografii i Rozwoju Regionalnego, 35, Uniwersytet Wrocławski, Wrocław.
- Śleszyński P. (red.), 2013, *Wskaźniki zagospodarowania i ładu przestrzennego w gminach*, Biuletyn KPZK PAN, 252, Warszawa.
- Theil H., 1967, *Economics and Information Theory*, North-Holland, Amsterdam.
- Thomas R.W., 1981, *Information Statistics in Geography*, Geo Abstracts, University of East Anglia, Norwich, UK.
- Torrens P.M., Alberti M., 2000, *Measuring Sprawl*, CASA Working Paper 27, Centre for Advanced Spatial Analysis (UCL), London.
- Uhorczak F., 1932, *Z metodyki badań nad osadnictwem*, Czasopismo Geograficzne, 10, 1-3, s. 11-28.
- Verzosa L.C.O., Gonzalez R.M., 2010, *Remote sensing, geographic information systems and Shannon's entropy: measuring urban sprawl in a mountainous environment*, [w:] W. Wagner, B. Székely (red.), *ISPRS TC VII Symposium – 100 Years ISPRS*, Vienna, Austria, 5-7 VII 2010, IAPRS, 38, Part 7A.
- Wędrowska E., 2010, *Wykorzystanie entropii Shannona i jej uogólnień do badania rozkładu prawdopodobieństwa zmiennej losowej dyskretnej*, Przegląd Statystyczny, 57, 4, s. 39-53.
- Wong D.W.S., Lasus H., Falk R.F., 2009, *Exploring the variability of segregation index D with scale and zonal systems an analysis of thirty US cities*, Environment and Planning A, 31, s. 507-522.
- Yeh A.G.O., Li X., 2001, *Measurement and monitoring of urban sprawl in a rapidly growing region using entropy*, Photogrammetry and Remote Sensing, 67, 1, s. 83-90.
- Zierhoffer A., 1934, *Pewien wzór na określenie stopnia rozproszenia i skupienia osiedli wiejskich*, [w:] H. Arctowski (red.), *Zbiór prac poświęconych przez Towarzystwo Geograficzne we Lwowie Eugeniuszowi Romerowi w 40-lecie jego twórczości naukowej*, Towarzystwo Geograficzne, Lwów, s. 488-494.

[Wpłynęło: marzec; poprawiono: czerwiec 2016 r.]

PAWEŁ SUDRA

APPLICATION OF SPATIAL CONCENTRATION INDICATORS TO THE STUDY OF URBAN SPRAWL PROCESSES

This article reviews selected indicative methods allowing for analysis of the concentration and dispersion of settlement. A further aim is to evaluate the utility of these measures in studying the spontaneous process of suburbanisation known as “urban sprawl”. Following the model of the “dispersed city”, as opposed to the “compact city”, it is assumed that urban sprawl is associated with scattering of development. It is therefore reasonable to assume that spatial concentration indicators will allow for the at least partial description of its physiognomy.

Urban sprawl is described as a multi-dimensional spatial phenomenon related to metropolitan deconcentration. Three fundamental spatial forms are observed: low-density sprawl, ribbon sprawl and leapfrog sprawl. Thereafter, issues are described in

relation to the nature of the spatial dispersion and diffusion, the influence of centripetal and centrifugal forces, and the occurrence of the modified areal unit problem (MAUP), in the analysis of urbanisation.

The four different measures chosen for actual review were the Gini coefficient, the *C* index of B. Kostrubiec, the average nearest neighbour method (Clark-Evans index) and Shannon entropy. Each of the indicators is analysed, with account taken of its theoretical and mathematical underpinnings, the adopted understanding of the spatial concentration concept, the impact of the delimitation of basic units on the results of spatial analyses, and available methods by which results may be presented.

The Gini coefficient, based on the Lorenz curve, and initially used in econometrics, determines the cumulated concentration of features within a smaller or larger number of spatial units. It measures the unevenness of spatial distribution, but does not consider the mutual location of the basic units. A further limitation of this indicator in studying urban sprawl is that it takes no account of the precise locations of the objects.

The spatial concentration index *C*, as proposed by B. Kostrubiec, is a measure of the concentration or dispersion of a set of elements – on a scale between concentration at one point and a spread across the maximum distance (range) it is possible to achieve within the boundaries of a certain area. The indicator is rarely used, but is of clear applicability, given the way it allows additional statistical parameters based on marginal distributions to be calculated.

The average nearest neighbour method (Clark-Evans index), as derived from ecology, is widely known and applied in urbanisation studies. It allows for observation of the attractive forces associated with the locating of buildings and other new developments. This indicator resembles the previous one in combining recognition of the level of dispersion and the randomness of a set of features.

Shannon entropy is a probabilistic measure of “disorder” and – in geography – a measure of segregation, the spatial organisation of an area, or, most simply, the proportion of the share of a phenomenon in territorial units. Entropy defines fragmentation or the filling of terrain with settlement. It is often used in researching land use and land cover change.

This article concludes with a table describing the main features of the four indicators. Methods of multidimensional analysis of urban sprawl are also highlighted. These are important because the morphology of sprawl cannot be defined solely by reference to the degree of spatial concentration, which is understood and defined in various ways. Other important spatial dimensions include density, continuity, clustering, centralisation or the mixed use of land.

In the author’s view, the most comprehensive assessment of the phenomenon of sprawl will be made possible if several methods are selected, and parallel analyses carried out using them. In these circumstances, complementary information will be obtained as regards the concentration and dispersion of development in an area.

