

**Paulina Pokojaska**

Uniwersytet Warszawski, Wydział Geografii i Studiów Regionalnych

e-mail: ppokojaska@uw.edu.pl

## **PODEJŚCIE ZINTEGROWANE W MODELOWANIU ZMIAN UŻYTKOWANIA ZIEMI – MODEL CLUE I JEGO MODYFIKACJE**

### **Integrated framework in land use change modeling – model CLUE and its modifications**

**Słowa kluczowe:** modelowanie zmian użytkowania ziemi, model CLUE

**Key words:** land use change modelling, CLUE model

#### **WSTĘP**

Zmiany użytkowania ziemi są jednym z istotnych procesów kształtujących środowisko przyrodnicze. W ich badaniu ugruntowane miejsce zajmuje modelowanie matematyczne. Modele LUCC (ang. *Land Use and Cover Change*) odgrywają ważną rolę w poznawaniu mechanizmów zachodzenia zmian w użytkowaniu ziemi, ich predykcji i są bardzo przydatne we wspieraniu polityk różnych instytucji i organów administracji bezpośrednio lub pośrednio wpływających na pokrycie i użytkowanie terenu.

Użytkowanie ziemi jest wypadkową oddziaływania wielu czynników (ang. *driving factors*), które w odniesieniu do skali przestrzennej można podzielić na czynniki o zasięgu ponadregionalnym, np. krajowym czy wręcz globalnym, oraz czynniki o znaczeniu lokalnym, oddziałujące na pokrycie i użytkowanie terenu w danym miejscu. Model, w zależności od przestrzennej skali badań, powinien uwzględniać te czynniki w odpowiedniej proporcji, jednak jej ustalenie wymaga dogłębnego poznania mechanizmów rządzących zmianami użytkowania ziemi i ujęcia ich w odpowiednie reguły matematyczne, co jest złożonym zadaniem.

Modele LUCC obejmują różne skale przestrzenne i czasowe oraz opierają się na różnych metodach obliczeniowych. W ciągu ostatnich 30 lat, wraz z rozwojem mocy obliczeniowych komputerów i postępem w technikach pozyskiwania szczegółowej informacji przestrzennej o powierzchni terenu (rozwój teledetekcji) i w technikach przetwarzania danych przestrzennych (rozwój GIS), postęp dokonywał się także w opracowaniu algorytmów modeli LUCC. Wprowadzane były

zaawansowane, różnorodne techniki obliczeniowe (np. automaty komórkowe czy sieci neuronowe). Modele rozwijały się w kierunku modeli uwzględniających kilka form użytkowania ziemi (tzw. modeli zintegrowanych) i realizujących obliczenia w regularnej siatce komórek. Przykładem takiego modelu jest CLUE (ang. *Conversion of Land Use and its Effects*), który był rozwijany i modyfikowany przez ostatnie 20 lat. W wyniku tych zmian powstało kilka wersji modelu, którym zostały nadane zmodyfikowane nazwy z zachowaniem członu „CLUE”. Obecnie można go określić jako najbardziej znany i najczęściej stosowany model użytkowania ziemi na świecie (van Soesbergen 2015). W niniejszej pracy, mającej charakter przeglądowy, przedstawione zostały założenia metodyczne i struktura modelu, historia jego rozwoju oraz pola jego zastosowań.

## OGÓLNA CHARAKTERYSTYKA MODELU

CLUE (ang. *Conversion of Land Use and its Effects*) jest modelem przeznaczonym do symulacji zmian użytkowania ziemi i pokrycia terenu. Model został opracowany w 1996 roku na Uniwersytecie Rolniczym<sup>1</sup> w Wageningen (Veldkamp, Fresco 1996a, 1996b) i był stopniowo rozwijany i przystosowywany do wykorzystania w coraz bardziej szczegółowej skali przestrzennej. Kolejnymi wersjami modelu są szeroko stosowana CLUE-S (*Conversion of Land Use and its Effects at Small regional extent*) (Verburg, Veldkamp 2002) i jego modyfikacja Dyna-CLUE (*Dynamic Conversion of Land Use and its Effects*) (Verburg, Overmars 2009). Model, sparametryzowany do zastosowania w konkretnych warunkach, występuje także pod zmodyfikowanymi nazwami, powstałymi z dołączenia do podstawowej nazwy modelu sufiksu oznaczającego badany teren, np. CLUE-CR (ang. *Costa Rica*) (Schoorl i in. 1997), CLUE-CA (ang. *Central America*) (Kok, Veldkamp 2001). Opracowana została także wersja CLUE-Scanner, przeznaczona do wspierania realizacji zadań instytucji unijnych jako narzędzie oceny przewidywanych zmian w użytkowaniu ziemi. Za jej pomocą w projekcie badawczym zleconym przez Dyрекcję Generalną ds. Środowiska Komisji Europejskiej (DG ENV) przeprowadzono analizę, do jakich zmian w użytkowaniu ziemi może dojść skutek polityk wdrażanych przez Unię Europejską (Pérez-Soba i in. 2010). Model w tej wersji jest także wykorzystywany we Wspólnotowym Centrum Badawczym (ang. *Joint Research Centre*)<sup>2</sup>.

Model charakteryzuje się dużym stopniem złożoności, obejmuje bowiem system użytkowania ziemi całościowo, uwzględniając jednocześnie różne formy użytkowania ziemi, a jego konstrukcja pozwala na modelowanie zmian użytkowania ziemi według założonych scenariuszy. Model w różnych wersjach został wykorzystany w kilkudziesięciu badaniach zmian użytkowania terenu, w tym, jak

<sup>1</sup> Obecnie Wageningen University.

<sup>2</sup> CLUE-Scanner, 2011, <http://www.ivm.vu.nl/en/projects/Projects/spatial-analysis/clue-scanner/index.aspx>. Data dostępu: 9.08.2016.

wspomniano, w projektach dotyczących oceny skutków polityk realizowanych przez organy Unii Europejskiej (Verburg i in. 2002). Model znalazł zastosowanie na różnych obszarach położonych w Europie, Azji, Ameryce Pn., Środkowej i Płd., a także w Afryce.

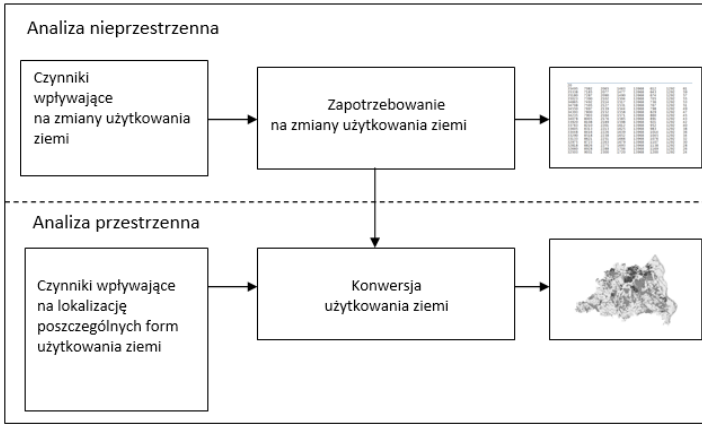
W podejściu CLUE predykcja zmian użytkowania ziemi jest przeprowadzana poprzez dynamiczne modelowanie konkurencji między poszczególnymi klasami użytkowania ziemi (Verburg i in. 1999a, Verburg, Lesschen b.d.). W modelowaniu uwzględnia się szereg informacji i parametrów, które kształtują zmiany użytkowania ziemi: przewidywane trendy w użytkowaniu ziemi, zależności pokrycia i użytkowania terenu od przyrodniczych i poza-przyrodniczych czynników przestrzennych, możliwe formy konwersji między poszczególnymi klasami użytkowania ziemi (tzw. reguły decyzyjne) oraz sparametryzowane koszty przekształcenia każdej formy użytkowania w inną klasę. Na potrzeby modelowania konieczne jest przygotowanie danych przestrzennych reprezentujących zasięg i użytkowanie badanego obszaru (w tym obszary wyłączone z przemian), rozkład przestrzenny czynników oddziałujących na rozmieszczenie poszczególnych klas użytkowania ziemi oraz zdefiniowanie parametrów regulujących tempo i kierunki możliwych przemian użytkowania ziemi.

## STRUKTURA MODELU

Algorytm modelowania w modelu CLUE-s jest dwuetapowy, a modelowanie jest przeprowadzane dwuetapowo (ryc. 1). Pierwszy etap modelowania, nieprzestrzenny (ang. *non spatial*), ma na celu określenie zapotrzebowanie na zmiany użytkowania ziemi w określonym przedziale czasu na obszarze poddanym analizie. Zapotrzebowanie to jest określane mianem popytu (ang. *demand*) (Verburg i in. 2002). Analizę na tym etapie przeprowadza się poza modelem, niemniej jest ona traktowana jako integralna część modelowania. Odnosi się ona do wyższego stopnia agregacji przestrzennej niż następujący po niej etap modelowania mający na celu opracowanie przewidywanego rozkładu przestrzennego użytkowania ziemi.

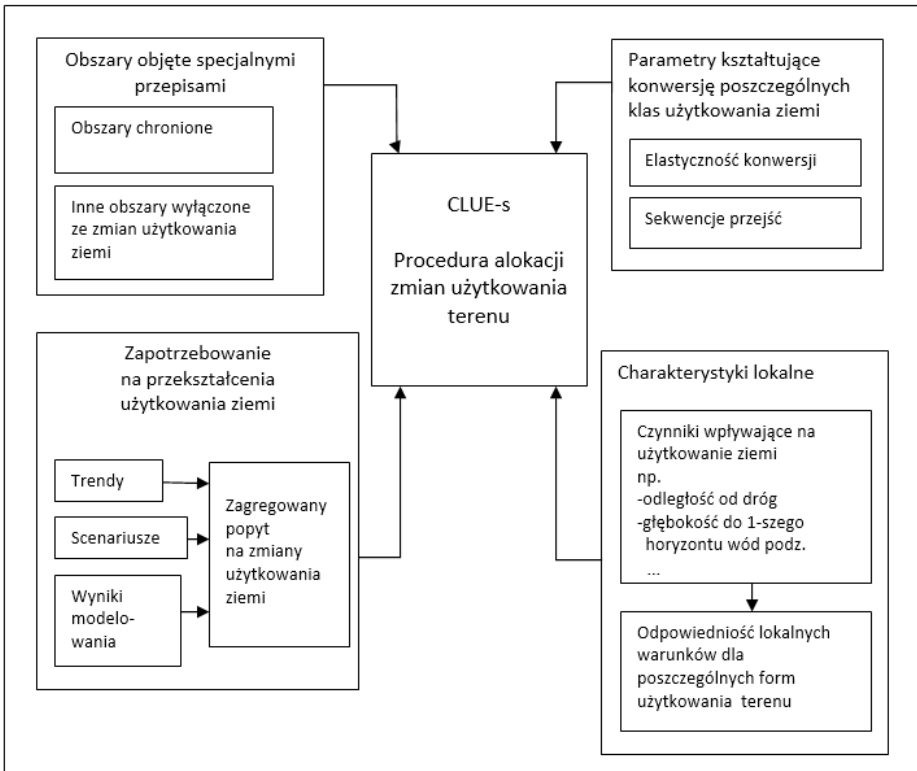
Drugi etap modelowania odbywa się w module zwanym przestrzennym modelem alokacji (ang. *spatial allocation model*), stanowiącym niezależny program komputerowy. Niezbędnym elementem wejścia do modelu jest mapa użytkowania ziemi, która w modelowanym przedziale czasu reprezentuje stan użytkowania ziemi uznany za początkowy. Najczęściej jest to mapa obecnie występującego użytkowania terenu. Ponadto do przeprowadzenia modelowania konieczne jest przygotowanie czterech kategorii danych wejściowych (Verburg i in. 2005, Verburg, Overmars 2009, Verburg, Lesschen b.d., Verburg, 2010) (ryc. 2):

1. Przewidywany popyt na zmiany użytkowania ziemi, wyrażony liczbowo w postaci powierzchni, jakie będą zajęte przez każdą klasę użytkowania ziemi w kolejnych latach całego okresu objętego symulacją (jest to wynik pierwszego etapu modelowania).



**Ryc. 1.** Uproszczona procedura modelowania w podejściu CLUE. Źródło: Verburg P., 2010, zmodyfikowany

**Fig. 1.** Simplified scheme of modeling in CLUE framework, Source: Verburg P., 2010, modified



**Ryc. 2.** Składowe modelu CLUE-s. Źródło: Verburg P., 2010, zmodyfikowany

**Fig. 2.** Elements of CLUE-s model. Source: Verburg P., 2010, modified

2. Rozkłady przestrzenne czynników, uznanych za istotne dla struktury przestrzennej użytkowania ziemi na badanym obszarze oraz współczynniki beta z równania regresji logistycznej, wyrażającej zależność między tymi czynnikami, a stanem użytkowania ziemi, uznanym za początkowy. Rozkłady przestrzenne tych czynników są wprowadzane do modelu w postaci map cyfrowych zbudowanych z regularnej siatki komórek. Do modelu są wprowadzane tylko te współczynniki regresji logistycznej, które reprezentują czynniki wpływające na rozkład przestrzenny poszczególnych form użytkowania ziemi w sposób statystycznie istotny. Oznacza to, że dla każdej formy użytkowania może być, i zazwyczaj jest, inny zestaw czynników, branych pod uwagę w predykcji.

3. Parametry charakteryzujące proces konwersji użytkowania ziemi. Pierwszym jest parametr wyrażający elastyczność przejścia każdej klasy użytkowania ziemi w inną (ang. *conversion elasticity*), drugim jest sekwencja możliwych konwersji każdej klasy użytkowania ziemi w inne formy użytkowania (tzw. ścieżki przejścia) (ang. *land use transition sequences*).

4. Zasięg przestrzenny obszarów wykluczonych ze zmian użytkowania ziemi ze względu na prowadzoną politykę przestrzenną, ochronę środowiska lub inne ograniczenia. Zasięg tych obszarów musi być oznaczony odpowiednim kodem (-9998) w warstwie definiującej zasięg modelowanego obszaru.

Wszystkie wymienione dane przestrzenne (mapa zasięgu obszaru badawczego z ewentualnymi obszarami wykluczonymi z modelowania, mapa początkowego użytkowania ziemi oraz mapy czynników wpływających na użytkowanie ziemi) oraz wartości parametrów (współczynniki regresji między poszczególnymi formami użytkowania ziemi i czynnikami wpływającymi na te zmiany, parametry elastyczności konwersji i sekwencji przejść) tworzą zespół informacji i warunków, na podstawie których model w drodze kolejnych iteracji znajduje rozwiązanie w postaci przewidywanego rozkładu przestrzennego zmian użytkowania ziemi. Etapami pośrednimi obliczeń w modelu są mapy prawdopodobieństw zmiany formy użytkowania ziemi dla każdego kolejnego roku objętego prognozą (Verburg i in. 2002). W dalszej części tekstu kolejno omówiono każdą z czterech przedstawionych kategorii danych i parametrów.

### **Popyt na zmiany użytkowanie ziemi**

Całkowita wielkość zmian użytkowaniu ziemi, symulowanych przez model, jest ograniczana poprzez wyrażone ilościowo zapotrzebowanie na te zmiany w kolejnych latach objętych prognozą (tzw. popyt). Zapotrzebowanie to, opracowane w kilku wariantach, może pełnić funkcję scenariuszy przewidywanych trendów i rozmiarów zmian użytkowania ziemi. Przewidywane zapotrzebowanie na zmiany w użytkowaniu ziemi jest wyrażane w jednostkach powierzchni (ha), jakie będą zajmowały poszczególne klasy użytkowania ziemi w każdym roku okresu objętego prognozą. W kolejnych latach suma powierzchni, jakie – zgodnie z przewidywaniami – ma zająć każda forma użytkowania ziemi, musi być równa całkowitej powierzchni modelowanego obszaru. Trend czasowy zmian dla każdej

klasy użytkowania ziemi w modelowanym przedziale czasu może być rosnący lub malejący, mogą także występować formy użytkowania, dla których nie przewiduje się żadnych zmian (Verburg et al. 2005, Verburg, Overmars 2009). Do powierzchni, które nie ulegają przekształceniom, najczęściej zalicza się trwałe elementy krajobrazu, takie jak np. wody powierzchniowe. Ograniczeniem przy wyznaczaniu trendów zmian jest wymóg, aby trend zmian powierzchni każdego użytku był liniowy w badanym okresie.

Popyt na przekształcenie początkowej struktury użytkowania ziemi, jak wspomniano wcześniej, jest obliczany poza modelem. Stosuje się różne metody jego wyliczenia. Pierwszym podejściem jest określenie, jakie trendy użytkowania ziemi zachodziły w przeszłości i ich ekstrapolacja na modelowany przedział czasu. Jeśli istnieją ku temu przesłanki, podstawą obliczeń przewidywanych powierzchni, które mają ulec przekształceniu pod względem formy użytkowania, mogą być: przewidywane zmiany liczby ludności (Verburg i in., 2005), zapisy w aktach prawa, które będą miały wpływ na użytkowanie ziemi (np. rozwój upraw pod produkcję biopaliw) oraz polityka prowadzona przez władze różnego szczebla, której celem jest np. przyciągnięcie inwestorów na dany obszar poprzez ułatwienie im realizacji nowych inwestycji na odrolnianych gruntach. Zakładane zmiany użytkowania ziemi mogą być wynikiem analiz przeprowadzonych za pomocą modeli makroekonomicznych (Verburg i in., 2005). Przykładem takiego rozwiązania jest wyliczenie zapotrzebowania na zmiany użytkowania ziemi przeprowadzone na podstawie wyników symulacji uzyskanych z modelu CAPRI (Model Zregionalizowanego Oddziaływania Wspólnej Polityki Rolnej) w ramach projektu EU-RURALIS (Overmars i in. 2013). Podobny mechanizm zastosowano w ramach projektu SENSOR, w którym popyt na zmiany użytkowania ziemi na potrzeby modelu CLUE-s obliczono na podstawie wyników uzyskanych z modelu makroekonomicznego NEMESIS (Verburg i in. 2008a, Helming i in. 2011). W opracowaniu popytu na ziemię do modelu CLUE-s korzystano także z metodologii SD (ang. *System Dynamics*) (Luo i in. 2010, Wu i in. 2015).

### **Relacja między czynnikami sprawczymi (ang. *driving factors*) a użytkowaniem ziemi**

Kolejnym elementem wejścia do modelu są współczynniki regresji logistycznej, opisujące zależność użytkowania ziemi od czynników wpływających na te zmiany (Verburg i in. 2005). Regresja logistyczna jest wykorzystywana, gdy zmienna zależna przyjmuje wartości dychotomiczne, dlatego też podstawą jej wyznaczenia są zerojedynkowe mapy każdej klasy użytkowania terenu (Verburg i in., 2005). Mapy czynników, które mają wpływ na użytkowanie (zmiennie niezależne), nie muszą być zapisane w skali dychotomicznej. Za pomocą regresji logistycznej obliczane są prawdopodobieństwa przeznaczenia każdej komórki na mapie pod poszczególne formy użytkowania ziemi wskutek oddziaływania czynników sprawczych (Verburg i in. 2002).

$$\text{Log} (P_i/(1 - P_i)) = \beta_0 + \beta_1 X_{1,i} + \beta_2 X_{2,i} + \dots + \beta_n X_{n,i}$$

gdzie:

$P_i$  – prawdopodobieństwo pojawienia się rozpatrywanej klasy użytkowania ziemi,  
 $X$  – czynniki sprawcze.

Dopasowanie modelu logitowego jest oceniane za pomocą ROC (ang. *Receiver Operating Characteristic*) (Pontius, Schneider 2001, Verburg i in. 2005).

Ten etap modelowania wymaga opracowania map czynników, które potencjalnie są istotne dla rozkładu użytkowania ziemi na badanym obszarze. Czynniki te są tradycyjnie dzielone na dwie grupy: społeczno-ekonomiczne i fizycznogeograficzne. W analizie regresyjnej zazwyczaj jest stosowanych od kilku do kilkunastu, rzadziej kilkudziesięciu, czynników. Wśród czynników fizycznogeograficznych często są uwzględniane: wysokość bezwzględna, nachylenie terenu, odległości od zbiorników wodnych, a wśród czynników społeczno-ekonomicznych – odległość od sieci transportowej. W modelowaniu brane są pod uwagę tylko te czynniki, które w wyniku binominalnej analizy regresyjnej okazują się istotne dla rozkładu danej formy użytkowania. Do modelu, wraz z mapami czynników, są wprowadzane statycznie istotne wartości współczynników beta z równań regresji logistycznej ustalonych dla poszczególnych klas użytkowania ziemi. Zastosowanie modelu regresji logistycznej do wyznaczenia wpływu czynników na użytkowanie ziemi M. Heistermann (Heistermann i in. 2006) uważa za słabszą stronę podejścia CLUE, ponieważ takie podejście nie pozwala na głębsze zrozumienie interakcji między czynnikami sprawczymi i rozkładem przestrzennym poszczególnych klas użytkowania ziemi. Jednocześnie jednak należy podkreślić, że takie rozwiązanie umożliwia uchwycenie i matematyczne opisanie złożonych zależności między czynnikami i użytkowaniem ziemi.

### **Parametry charakteryzujące proces konwersji użytkowania ziemi**

Zasady przejść poszczególnych form użytkowania ziemi w inne formy (ang. *conversion rules*) są ujmowane w macierz konwersji. Macierz konwersji zawiera informację, w które formy użytkowania ziemi może ulec przekształceniu każda klasa użytkowania, a w których przypadkach konwersja jest niemożliwa. Możliwość konwersji jest kodowana za pomocą wartości 0 i 1. Jeśli konwersja jest możliwa, jest ona w macierzy reprezentowana przez wartość 1, konwersja uznana za niemożliwą, jest oznaczana wartością 0. Opcjonalnie w macierzy można także zapisać bardziej złożone reguły przejść, określając czas, jaki musi upłynąć, by dokonała się konwersja wybranej klasy użytkowania ziemi w inną (Verburg, Overmars 2009) oraz/lub ile maksymalnie lat wskazana forma użytkowania może pozostać w danym miejscu. Jest to przydatne np. w modelowaniu użytków rolnych, które podlegają płodozmianowi (Verburg i in. 2005).

Elastyczność konwersji (ang. *conversion elasticity*) wyraża koszty przejścia danej formy użytkowania w inną. Koszty te są rozumiane szeroko; Verburg i Overmars (2009) wyróżniają wśród nich koszty pieniężne i instytucjonalne; ponadto należy do nich zaliczyć także koszty społeczne. Im są one wyższe dla danej klasy

użytkowania ziemi, tym prawdopodobieństwo, że dojdzie do jej zastąpienia przez inną formę użytkowania, jest mniejsze i w takim przypadku parametr powinien mieć nadaną większą wartość. Wartości parametru mieszczą się w przedziale [0-1]. Parametr ten jest nośnikiem informacji o „oporności” poszczególnych klas użytkowania w procesie ich konwersji i w procesie alokacji przestrzennej form użytkowania terenu reguluje on tempo zmian każdej klasy użytkowania ziemi. Parametr ten często przyjmuje wysokie wartości dla lasów i zabudowy, niskie zaś dla terenów niezagospodarowanych i użytków rolnych, szczególnie położonych na gorszych klasach gruntów ornych.

### **Obszary wyłączone z analizy**

Na terenie objętym modelowaniem mogą występować obszary, na których zmiany użytkowania ziemi są zabronione lub też mogą zachodzić w ograniczonym zakresie. Ograniczenia we wprowadzaniu zmian użytkowania ziemi mogą być związane z ustanowieniem form ochrony przyrody, mogą one także wynikać z zapisów w aktach prawa miejscowego (np. Miejscowych Planów Zagospodarowania Przestrzennego) i dokumentów planistycznych na wyższym szczeblu (np. Planów Zagospodarowania Przestrzennego poszczególnych województw). Zmiany użytkowania ziemi mogą także być zaplanowane w celu realizacji ważnych celów społecznych – w Polsce przykładem takiego mechanizmu jest przejmowanie przez Skarb Państwa prawa własności nieruchomości gruntów pod budowę nowych dróg lub rozbudowę dróg istniejących<sup>3</sup>.

Na potrzeby modelowania można na analizowanym obszarze wydzielić regiony. Dla każdego regionu można wprowadzić odrębny zestaw czynników sprawczych i określić inny popyt na zmiany użytkowania ziemi (Verburg i in. 2005). Możliwe jest także określenie różnych ścieżek konwersji użytkowania ziemi dla poszczególnych regionów (Verburg i in. 2005). Podział na regiony pozwala zróżnicować kierunki zmian, jakim ma podlegać badany obszar, wzmacniając tym samym rolę procesów rządzących zmianami użytkowania ziemi w skali regionalnej.

Kolejną funkcją, o którą można rozbudować działanie modelu, jest oddziaływanie sąsiedztwa na zmiany użytkowania ziemi (Verburg i in. 2005). W takim przypadku należy określić wagi poszczególnych form użytkowania ziemi oraz dla każdej formy użytkowania ziemi określić promień oddziaływania sąsiedztwa (zdefiniowany poprzez liczbę komórek) i kształt uwzględnianego sąsiedztwa (określany poprzez nadanie komórkom sąsiadującym wartości 0 lub 1).

### **Procedura alokacji przestrzennej**

W pierwszym kroku identyfikowane są i wyłączane z dalszych obliczeń obszary, na których nie są przewidywane zmiany użytkowania ziemi, niezależnie od nadrzędnie określonych trendów i parametrów dla całego obszaru.

<sup>3</sup> Przejmowanie następuje na podstawie *Ustawy z 10 kwietnia 2003 r. o szczególnych zasadach przygotowania i realizacji inwestycji w zakresie dróg publicznych* (Dz.U. z 2008 r. nr 193 poz. 1194 z późn. zm.).



W drugim kroku w modelu dla każdej formy użytkowania ziemi jest obliczane całkowite prawdopodobieństwo jej wystąpienia w danej komórce, zgodnie ze wzorem (Verburg i in., 2005).

$$TPROP_{i,u} = P_{i,u} + ELAS_u + ITER_u$$

gdzie:

$TPROP_{i,u}$  – całkowite prawdopodobieństwo pojawienia się danej formy użytkowania ziemi w rozpatrywanej komórce (pikselu). Prawdopodobieństwo jest obliczane dla wszystkich form użytkowania ziemi, które mają brać udział w konwersji w danej komórce.

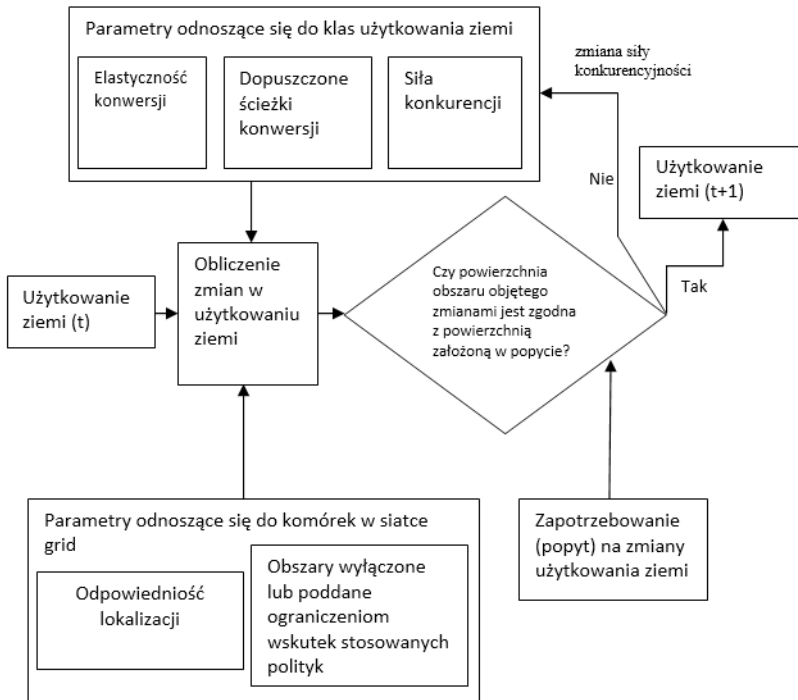
$P_{i,u}$  – odpowiedniość danego miejsca (komórki  $i$ ) dla danej formy użytkowania ziemi  $u$ , określana na podstawie regresji logistycznej między użytkowaniem ziemi a czynnikami sprawczymi,

$ELAS_u$  – elastyczność konwersji, charakteryzująca formę użytkowania występującą w rozpatrywanej komórce,

$ITER_u$  – zmienna iteracyjna określana podczas analizy dla każdej formy użytkowania oznaczająca siłę konkurencyjności danej formy użytkowania.

Początkowa alokacja jest wykonywana przy założeniu jednakowej wartości zmiennej iteracyjnej dla wszystkich typów użytkowania ziemi, a istniejące klasy użytkowania są zastępowane przez klasy o największym całkowitym prawdopodobieństwie pojawienia się wyliczonym dla danej komórki. Z tego etapu obliczeń są wyłączone komórki, w których użytkowanie ziemi ma pozostać niezmienione. W następnym kroku całkowita powierzchnia, na której w wyniku modelowania doszło do konwersji użytkowania ziemi na badanym obszarze, jest porównywana z założonym zapotrzebowaniem na tę konwersję. Porównanie jest przeprowadzane w odniesieniu do każdej formy użytkowania ziemi; jeśli powierzchnia, która uległa konwersji jest większa od popytu na zmiany użytkowania ziemi, zmienna iteracyjna dla tej formy użytkowania jest zmniejszana, jeśli zaś powierzchnia jest zbyt mała – zmienna iteracyjna jest zwiększana, i procedura iteracyjna jest przeprowadzana ponownie (ryc. 3). Procedura ta jest tak długo powtarzana, aż powierzchnie wymodelowanych form użytkowania ziemi są zgodne z powierzchniami poszczególnych użytków, reprezentującymi założony na początku popyt na zmiany użytkowania ziemi. Dopuszczalne jest odchylenie tych wartości w określonym zakresie, jest ono wyrażone w jednostkach powierzchni lub też w ich wartościach procentowych przed rozpoczęciem modelowania.

Modelowanie dynamiki zmian użytkowania ziemi w modelu w obydwu wersjach CLUE-s i Dyna-CLUE łączy dwa podejścia: odgórne (ang. *top-down*) i oddolne (ang. *bottom-up*) (Verburg, Overmars 2009, Verburg 2010). W podejściu oddolnym czynnikami wpływającymi na konwersję są warunki środowiskowe i społeczno-ekonomiczne, charakteryzujące poszczególne komórki. Czynniki te są ujęte w postaci map. Podejście odgórne jest reprezentowane przez zapotrzebowanie na zmiany użytkowania ziemi określone w odniesieniu do całego modelowanego obszaru (lub ewentualnie regiony). W drodze iteracji te dwa podejścia



\*W przypadku braku zgodności między wymodelowaną a założoną (w postaci „popytu”) strukturą użytkowania ziemi, ponownie jest obliczany w drodze iteracji kolejny rozkład przestrzenny użytkowania ziemi przy zmienionej sile konkurencyjności.

**Ryc. 3.** Struktura modelu CLUE-s. Źródło: Verburg P., 2010.

**Fig. 3.** Structure of CLUE-s model. Source: Verburg P., 2010.

ścierają się ze sobą i, co ważne, może dojść do sytuacji, w której w celu wypełnienia zakładanego popytu konwersja nastąpi w formy użytkowania, które nie mają najwyższego prawdopodobieństwa wystąpienia w danym miejscu (Verburg i in., 2002). Dzięki takiemu rozwiązaniu model pozwala odwzorowywać bardzo złożone struktury przestrzenne, z uwzględnieniem wielu różnoskalowych czynników, co jest jego wielką zaletą. Kolejną zaletą jest dowolność doboru rozdzielczości przestrzennej danych wejściowych, dzięki czemu model nadaje się do stosowania w różnych skalach przestrzennych – od skali lokalnej do skali globalnej.

Model CLUE w pierwotnej wersji został zaklasyfikowany przez autorów jako model dynamiczny (ang. *dynamic*), nieciągły, o skończonej liczbie stanów (ang. *discrete finite state model*) (Veldkamp, Fresco 1996b). Zastosowane w pierwszej wersji modelu (CLUE) przypisanie podstawowym jednostkom przestrzennym udziału procentowego poszczególnych klas użytkowania ziemi (zamiast podziału na jednostki homogeniczne, reprezentujące pojedyncze formy użytkowania ziemi),

autorzy określają za R.G. Pontiusa i L.C. Cheukiem (2006) jako „*soft classified system*” (Verburg, Overmars 2007). Kolejną wersję modelu (CLUE-s), ze względu na wprowadzenie w jego strukturze podstawowych geometrycznych jednostek powierzchniowych (komórek) G.D. Brown zaliczył do modeli komórkowych<sup>4</sup> (Brown i in. 2013). Model CLUE-s jest także określany mianem modelu hybrydowego (Verburg i in. 2008a), ponieważ łączy różne podejścia metodyczne: zależność regresyjną między czynniki sprawczymi a użytkowaniem ziemi oraz modelowanie dynamiczne przeprowadzane w drodze iteracji. M. Heistermann i in. (2006) klasyfikuje go z kolei jako model geograficzny, empiryczno-statystyczny. Soesbergen (2015), podtrzymując to zaklasyfikowanie, umieszcza go w jednej grupie modeli wraz z modelami IDRISI Land Cover Modeler (LCM) i DINAMICA EGO (*Environment for Geoprocessing Objects*). H. Briassoulis (b.d.) zaliczyła natomiast model CLUE do symulacyjnych modeli poziomu regionalnego (ang. *regional level simulation models*).

## HISTORIA I ZASTOSOWANIA MODELU

Zastosowania modeli z rodziny CLUE można pogrupować według kilku kryteriów. W tym celu wzięto pod uwagę wielkość obszaru objętego modelowaniem, rozdzielczość przestrzenną przyjętą w modelu i główny proces, charakteryzujący zmiany użytkowania ziemi na badanych obszarach, np. deforestację czy tzw. rozlewanie się miast (ang. *urban sprawl*). Następnie przytoczono przykłady badań, w których modelowanie użytkowania ziemi za pomocą modeli z rodziny CLUE było powiązane z dalszymi badaniami innych procesów i zjawisk, np. hydrologicznych czy geomorfologicznych. Nawiązano także do prac, w których wyniki modelowania były porównywane z wynikami uzyskanymi z innych modeli LUCC.

Model CLUE został po raz pierwszy zastosowany w 1996 roku (Veldkamp, Fresco 1996a). Początkowo struktura modelu była dostosowana do analiz obszarów o dużej powierzchni, np. kontynentu lub kraju. Jak wspomniano wcześniej, podstawowej jednostce przestrzennej zastosowanej w modelu (komórce) była przypisana procentowa struktura użytkowania ziemi (Orekan 2007). Takie podejście pozwalało maksymalnie wykorzystać informacje o strukturze użytkowania ziemi dostępne np. dla jednostek podziału administracyjnego, jednak ograniczało możliwości zastosowania modelu w skali regionalnej i lokalnej.

Model został po raz pierwszy zastosowany w odniesieniu do Kostaryki (wersja modelu CLUE-CR) (Veldkamp, Fresco 1996b) (Schoorl i in. 1997). Kolejnymi obszarami badawczymi były Ekwador (De Koning i in. 1999), Indonezja (wyspa Jawa) (Verburg, i in. 1999b), Środkowa Ameryka (Kok, Veldkamp 2000) oraz Chiny (Verburg, Chen 2000, Verburg, Veldkamp 2001). Badania te charakteryzowały się małą rozdzielczością przestrzenną - w Kostaryce przyjęto rozdzielczość 2 km,

<sup>4</sup> Nie należy mylić tej kategorii z automatami komórkowymi (ang. *cellular automata*, CA), automaty komórkowe są w tej klasyfikacji jednym z podtypów modeli komórkowych.

w Ekwadorze 9,25 km, a w Środkowej Ameryce 15 km. W badaniach dotyczących wschodniej części Chin zastosowano rozdzielczość 32 km, która nawiązywała do średniej wielkości powiatu w tej części Chin, co ułatwiało wykorzystanie danych statystycznych zbieranych na tym szczeblu podziału administracyjnego (Verburg, Chen 2000).

W 2002 roku Verburg z zespołem przedstawił ulepszoną wersję modelu CLUE, zwaną CLUE-s (ang. *Conversion of Land Use and its Effects at Small regional extent*), przeznaczoną do modelowania w skali regionalnej i zastosował ją na dwóch obszarach: w zlewni Klang-Langat położonej na zachodzie Malezji oraz na wyspie Sibuyan należącej do Indonezji (Verburg i in. 2002). W wersji CLUE-s wprowadzono homogeniczną strukturę piksela – przyjęto, że reprezentuje on jeden typ użytkowania ziemi. Zmiany poczynione w strukturze modelu umożliwiły wprowadzanie do modelu informacji pozyskiwanych z map cyfrowych i obrazów satelitarnych, i sprawiły, że model został przystosowany do badań w skali regionalnej (Verburg i in. 2002). Zwiększyła się rozdzielczość map wejściowych, wykorzystywanych w modelowaniu, która zaczęła odpowiadać skalom od regionalnej do lokalnej; przekroczyła ona 1 km i w wielu kolejnych badaniach osiągnęła kilkadziesiąt metrów. Wśród obiektów badań pojawiły się obszary niewielkie, o powierzchni rzędu setek, rzadziej dziesiątek, kilometrów kwadratowych. Model w tej wersji został zastosowany kilkadziesiąt razy. Największa rozdzielczość jaką przyjętą w badaniach z wykorzystaniem wersji CLUE-s wynosi 10 metrów<sup>5</sup> - badania w takiej rozdzielczości dotyczyły wpływu zmian użytkowania ziemi na wartość krajobrazu w Chinach w dzielnicy Baoshan w Szanghaju (powierzchnia 29,7 km<sup>2</sup>) (Wu i in. 2015). Kolejnymi przykładami badań, w których zastosowano dużą rozdzielczość terenową, są: modelowanie zmian użytkowania ziemi w zlewni rzeki South Nation we wschodniej części prowincji Ontario w Kanadzie (rozdzielczość 30 m, powierzchnia obszaru: 3,9 tys. km<sup>2</sup>) (El-Khoury i in. 2014), modelowanie zmian użytkowania ziemi i ich wpływu na różnorodność populacji ptaków w zlewni cząstkowej rzeki Shangan na Tajwanie (rozdzielczość 40 m, pow. 209 ha) (Wu i in. 2011), modelowanie zmian użytkowania ziemi w zlewni rzeki Sangong w Chinach (rozdzielczość 50 m, pow. 942 km<sup>2</sup>) (Luo i in. 2010), modelowanie zmian użytkowania ziemi i ich wpływ na jakość wody w mezoskalowej zlewni w Bawarii (rozdzielczość 50 m, pow. 980 km<sup>2</sup>) (Mehdi i in. 2012), modelowanie deforestacji w parku narodowym The Northern Sierra Madre na Filipinach (rozdzielczość 50 m, pow. 485 km<sup>2</sup>) (Verburg i in. 2006a), modelowanie zmian użytkowania ziemi w zlewni rzeki Naoli we wschodnich Chinach na obszarze Sanjiang Plain (rozdzielczość 50 m, pow. 2,5 mln ha) (Dan i in. 2015).

W badaniach z wykorzystaniem modeli CLUE-s i wersji Dyna-CLUE, opracowanej w 2009 roku, często przyjmowano rozdzielczość terenową w przedziale od 100 m do 250 m. Rozdzielczość 100 m przyjęto w badaniach w prowincji Gyeonggi w Korei Płd. (Oh i in. 2011), w powiecie Taips w Chinach (Zhan i in. 2007),

<sup>5</sup> Należy jednak zwrócić uwagę, że wspomniana mapa użytkowania ziemi wykorzystana w modelowaniu oryginalnie była zapisana w rozdzielczości 125 m.

w zlewni The Dulce Creek w Argentynie (Lourdes i in. 2011, Lima i in. 2011), w modelowaniu zabudowy w strefie podmiejskiej Hongshan w Wuhan w Chinach (Xu, 2004). Pola o wymiarach 250 m/250 m zastosowano w badaniach Changqing – podmiejskiej dzielnicy w obszarze metropolitalnym Jinan w Chinach (Zheng i in. 2012), w zlewni rzeki South Nation w Kanadzie (El-Khoury, 2012), w zlewni rzeki Hun-Taizi w Chinach (Liu i in. 2011). W licznych badaniach przyjmowano także inne rozdzielczości mieszczące się w przedziale od 100 do 200 metrów.

Największe rozmiary pola podstawowego w badaniach z zastosowaniem CLUE-s i Dyna-CLUE mieszczą się w granicach od 1 km<sup>2</sup> do 2 km<sup>2</sup>. Większość badań w takiej rozdzielczości prowadzono na rozległych obszarach, o powierzchni rzędu milionów km<sup>2</sup> i były to Chiny (powierzchnia pola podstawowego: 2 km<sup>2</sup>; pow. 9,2 mln km<sup>2</sup>) (Sun, Yue, Fan, 2012) oraz Unia Europejska (powierzchnia pola podstawowego: 1 km<sup>2</sup>) (Britz i in. 2011, Helming i in. 2010, Overmars i in. 2013, Stürck i in. 2015, Verburg i in. 2008b). Powierzchnie obszarów, będących obiektem modelowania charakteryzuje się więc bardzo dużą rozpiętością, wynoszącą od kilku km<sup>2</sup>, jak np. dzielnica Kowloon w Hong-Kongu (8 km<sup>2</sup>) (Zheng i in. 2015) do milionów km<sup>2</sup>, jak w przypadku Chin (Sun i in. 2012) czy Unii Europejskiej (Verburg i in. 2006b, Verburg i in. 2010).

Model jest wykorzystywany w badaniach różnych procesów: deforestacji (Verburg i in. 2006a, Liu i in. 2009, Orékan 2007, Trisurat i in. 2010), rozlewania się miast (Lin i in. 2008, Batisani, Yarnal 2009, Chu i in. 2010, Babaei Agdam, Ebraheemzade Asmin 2012, Le Roux 2012, 2013, Xavier 2013, Xu i in. 2013, Price i in., 2015) i porzucania ziemi rolnej (Keenleyside, Tucker 2010, Price i in. 2015, Renwick i in. 2011).

Badania nad zmianami użytkowania ziemi są często podejmowane, jak wspomniano wcześniej, w celu określenia ich skali i rozkładu przestrzennego jako skutku polityk wdrażanych przez Unię Europejską. Przykładem mogą być przewidywania skutków polityki dotyczącej biopaliw na zmiany użytkowania ziemi w Unii Europejskiej (Banse i in. 2011, Pérez-Soba i in. 2010). Model nadaje się także do wyszukiwania obszarów, które mogą być poddane najsilniejszym przemianom użytkowania ziemi (tzw. *hot spots*) – przykładem są badania prowadzone we Włoszech, poświęcone predykcji wystąpienia takich obszarów pod koniec XXI wieku (Santini, Valentini 2011).

W zależności od celu badań, analizy prowadzone z zastosowaniem modelu CLUE w różnych jego wersjach, można podzielić na dwa nurty. W pierwszym nurcie mieszczą się badania, w których predykcja zmian użytkowania terenu jest celem końcowym. Drugi nurt obejmuje badania, w których modelowanie zmian użytkowania ziemi jest celem pośrednim, a celem końcowym jest modelowanie przebiegu lub zróżnicowania przestrzennego innego procesu lub zjawiska, z uwzględnieniem tych zmian. W badaniach tych modelowanie zmian użytkowania ziemi jest zatem związane z dalszymi badaniami innych procesów i zjawisk. Przykładem modelowania związanego jest prognozowanie zmian odpływu ze zlewni (model SWAT) z uwzględnieniem prognozowanych zmian klimatu (model GCM)

i przewidywanych zmian użytkowania ziemi (model CLUE-s) (Park i in. 2010). Wpływ zmian użytkowania ziemi przewidywanych za pomocą modelu CLUE-s był uwzględniany w badaniach takich procesów zjawisk, jak: osuwiska (Promper i in. 2014), transport fluwialny ze zlewni (Galharte i in. 2014, Lippe 2015), erozja gleb i odpływ wód ze zlewni (Githui i in. 2009, Lin i in. 2009, Park i in. 2010, Zhou i in. 2013, Zhang i in. 2015), jakość wód podziemnych (Lima i in. 2011) - w tym zawartość azotu i fosforu w wodach podziemnych (Parshotam i in. 2013, Liu i in. 2014), bioróżnorodność (Overmars i in. 2013, Trisurat i in. 2010), stan populacji wybranych gatunków zwierząt (Trisurat, Duengkae 2011) i wartość krajobrazu (Wu i in. 2015).

W celu określenia wpływu zmian użytkowania ziemi (przewidywanych za pomocą modeli z rodziny CLUE) na wymienione procesy i zjawiska, w badaniach stosowano modele matematyczne: SWAT w badaniach odpływu i jakości wód (Githui i in., 2009, Zhou i in. 2013, Galharte i in. 2014, Zhang i in. 2015), ERODEP w badaniu erozji glebowej (Lippe 2015), LUCIA (Lippe, 2015) i HEC-HMS (Lin i in. 2009) w badaniu odpływu, DRASTIC w modelowaniu zanieczyszczenia wód (Lima i in. 2011, Park i in. 2010), AKWA-m w modelowaniu bilansu wodnego (Wahren i in. 2010), GLOBIO3 w badaniach bioróżnorodności (Trisurat i in. 2010) i MaxEnt w występowaniu wybranego gatunku ptaków (Trisurat, Duengkae 2011). Modele z rodziny CLUE są również przedmiotem badań porównawczych z innymi modelami LUCC, np. MOLAND/METRONAMICA, SLEUTH (Xavier 2013), DINAMICA EGO, CA\_MARKOV i Land Change Modeler (Mas i in. 2014), OLPSIM (Lin i in. 2009).

Są także podejmowane prace zmierzające do udoskonalenia modelu CLUE-s, np. poprzez zastosowanie alternatywnej metody określenia relacji między czynnikami wpływającymi na użytkowanie ziemi. W zlewni Paochiao, nieopodal Taipei (Tajwan), zastosowano w tym celu sztuczne sieci neuronowe (ANN), konstruuując model ANN-CLUE-s, a wyniki modelowania porównano z wynikami pochodzącymi z modelu Logistic-CLUE-s (Chu i in. 2010).

### **Informacje praktyczne**

Model jest udostępniany przez Instytut Studiów Środowiskowych (*Institute of Environmental Studies*), działający w ramach Faculty of Earth and Life Science na VU University Amsterdam. Obecnie dostępny jest on w dwóch wersjach: demonstracyjnej i pełnej Dyna-CLUE (v.2.0.) (Verburg, Overmars 2009), stanowiącej modyfikację wersji CLUE-s. Wersja demonstracyjna charakteryzuje się ograniczoną liczbą kolumn i rzędów na przetwarzanych mapach (odpowiednio: 128, 108), ograniczoną liczbą klas użytkowania ziemi (maksymalnie 5), ograniczoną liczbą regionów (1) i ograniczoną liczbą czynników rządzących (13 w modelu, 11 w poszczególnych równaniach regresji logistycznej). Wraz z plikami instalacyjnymi modelu udostępniany jest tutorial z ćwiczeniami (Verburg 2010) oraz wykaz kluczowych publikacji, dotyczących modelu. Pobranie modelu nie wymaga uiszczenia żadnej opłaty, model jest dystrybuowany jako freeware. Model działa

jako niezależny program komputerowy, a mapy użytkowania terenu oraz czynników wpływających na użytkowanie ziemi mogą być przygotowane w dowolnym oprogramowaniu GIS - muszą jednak zostać zapisane w formacie ASCII przed ich wprowadzeniem do modelu.

## UWAGI KOŃCOWE

Aplikacje do modelowania zmian użytkowania ziemi lub pokrycia terenu są cennym narzędziem w badaniach dotyczących predykcji zmian użytkowania ziemi i z pewnością będą dalej rozwijane, testowane i stosowane. Należy zauważyć, że wraz z zapotrzebowaniem na ich rozwój jednocześnie umacnia się ruch propagujący rozwój oprogramowania o otwartym kodzie źródłowym. W literaturze zwraca się uwagę na problemy wynikające z braku dostępności do kodów źródłowych algorytmów modeli użytkowania ziemi. S. Moulds i in. (2015) zauważa niepożądane konsekwencje zamknięcia kodu źródłowego, są to: ryzyko występowania tzw. „cichych” błędów, nieweryfikowalnych przez użytkowników właśnie z racji braku możliwości wglądu w kod źródłowy i niemożność dokładnego powtórzenia przeprowadzonych badań przez innych badaczy. Ulepszenie modelu lub przystosowanie go do własnych celów wymaga odtworzenia algorytmu modelu, co wskutek niejawności kodu prowadzi do poszukiwania rozwiązań, które już zostały wypracowane (Moulds, 2015 za: Morin i in. 2012, Pebesma i in. 2012, Steiniger, Hunter 2013). Model CLUE (w różnych wersjach), został szczegółowo opisany przez jego autorów, nie ma jednak ujawnionego kodu źródłowego. S. Moulds i in. (2015) opracowali algorytm lulcc w środowisku R, w którym starali się odtworzyć mechanizmy obliczeniowe zastosowane w modelu CLUE-s. Autorzy dodatkowo włączyli do algorytmu modelu etap obliczeń z zastosowaniem regresji logistycznej, realizowany w wersji CLUE-s poza strukturą modelu. Z dużym prawdopodobieństwem można przypuszczać, że tego typu podejście powoli, zmodyfikuje „rynek” modeli LUCC. Przyszłość modeli użytkowania ziemi to niewątpliwie modele tak metodycznie zaawansowane jak modele z rodziny CLUE. Jednocześnie można oczekiwać, zważywszy na umacnianie się ruchu wolnego i otwartego oprogramowania, że część modeli będzie opracowywana w postaci oprogramowania o otwartym kodzie źródłowym, który każdy badacz może przeanalizować i ewentualnie ulepszyć lub dostosować do własnych potrzeb.

## Literatura

- Babaei Agdam F., Ebraheemzade Asmin H., 2012, Modeling Agricultural and Arid Land use Changes Into Built-up in Ardail Urban Region Using CLUE-S Model, *Geography and Development*, 26, s. 5-8.
- Banse M., van Meijl H., Tabeau A., Woltjer G., Hellmann F., Verburg P.H., 2011, Impact of EU biofuel policies on world agricultural production and land use, *Biomass and Bioenergy*, 35(6), 2385-2390. <http://doi.org/10.1016/j.biombioe.2010.09.001>.
- Batisani N., Yarnal B., 2009, Uncertainty awareness in urban sprawl simulations: Lessons from a small US metropolitan region, *Land Use Policy*, 26(2), 178–185. <http://doi.org/10.1016/j.landusepol.2008.01.013>.
- Briassoulis H., n.d., Analysis of Land Use Change: Theoretical and Modeling Approaches. <http://www.rri.wvu.edu/webbook/briassoulis/contents.htm>
- Britz W., Verburg P.H., Leip A., 2011, Modelling of land cover and agricultural change in Europe: Combining the CLUE and CAPRI-Spat approaches, *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 142(1-2), 40–50. <http://doi.org/10.1016/j.agee.2010.03.008>.
- Brown G. D., Band L.E., Green K.O., Irwin E.G., Jain A., Lambin E.F., Pontius R.G. Jr., Seto K.C., Turner B.L II, Verburg, P. H., 2013, Advancing Land Change Modeling: Opportunities and Research Requirements Committee on Needs and Research Requirements for Land Change Modeling; Geographical Sciences Committee; Board on Earth Sciences and Resources; Division on Earth and Life Studies.
- Chu H.J., Lin Y.P., Wu C.F., 2010, Forecasting space-time land use change in the Paochiao watershed of Taiwan using demand estimation and empirical simulation approaches, *Lecture Notes in Computer Science (Including Subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*, 6016 LNCS(PART 1), 116-130. <http://doi.org/10.1007/978-3-642-12156-2-9>.
- Dan W., Wei H., Shuwen Z., Kun B., Bao X., Yi W., Yue L., 2015, Processes and prediction of land use/land cover changes (LUCC) driven by farm construction: the case of Naoli River Basin in Sanjiang Plain, *Environmental Earth Sciences*, 73(8), 4841-4851. <http://doi.org/10.1007/s12665-014-3765-9>.
- De Koning G., Verburg P.H., Veldkamp A., Fresco L.O., 1999, Multi-scale modelling of land use change dynamics in Ecuador, *Agricultural Systems*, 61 (2), 77-93.
- El-Khoury A., 2012, Modeling Land-Use Changes in the South Nation Watershed using Dyna-CLUE, Department of Civil Engineering University of Ottawa.
- El-Khoury A., Seidou O., Lapen D. R., Sunohara M., Zhenyang Q., Mohammadian M., Daneshfar B., 2014, Prediction of land-use conversions for use in watershed-scale hydrological modeling: A Canadian case study, *Canadian Geographer*, 58(4), 499-516. <http://doi.org/10.1111/cag.12105>
- Galharte C.A., Villela J.M., Crestana S., 2014, Estimativa da produção de sedimentos em função da mudança de uso e cobertura do solo, *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola E Ambiental*, 18(2), 188–193. <http://doi.org/10.1590/S1415-43662014000200010>.
- Githui F., Mutua F., Bauwens W., 2009, Estimating the impacts of land-cover change on runoff using the soil and water assessment tool (SWAT): case study of Nzoia catchment, Kenya / Estimation des impacts du changement d'occupation du sol sur l'écoulement à l'aide de SWAT: étude du cas du bassi. *Hydrological Sciences Journal*, 54(5), 899–908. <http://doi.org/10.1623/hysj.54.5.899>.



- Heistermann M., Muller C., Ronneberger K., 2006, Land in sight? Achievements, deficits and potentials of continental to global scale land-use modeling, *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 114(2-4), 141-158. <http://doi.org/10.1016/j.agee.2005.11.015>.
- Helming J., Jansen S., van Meijl H., Tabeau A., 2010, European farming and post 2013 CAP measures - A quantitative impact assessment study.
- Helming K., Diehl K., Kuhlman T., 2011, Ex Ante Impact Assessment of Policies Affecting Land Use, Part B: Application of the Analytical Framework, *Ecology and Society*, 16(1).
- Keenleyside C., Tucker G., 2010, Farmland Abandonment in the EU: an Assessment of Trends and Prospects, A report for WWF Netherlands. ss. 93. [http://www.ieep.eu/assets/733/Farmland\\_abandonment\\_in\\_the\\_EU\\_-\\_assessment\\_of\\_trends\\_and\\_prospects\\_-\\_FINAL\\_15-11-2010\\_.pdf](http://www.ieep.eu/assets/733/Farmland_abandonment_in_the_EU_-_assessment_of_trends_and_prospects_-_FINAL_15-11-2010_.pdf)
- Kok K., Veldkamp A., 2000, Multi-scale land use modelling using the CLUE-modelling framework. In A. N. and H. H. B.A.M. Bouman, H.G.P. Jansen, R.A. Schipper (red.), *Tools for Land Use Analysis at Different Scale Levels, with Case Studies for the Atlantic Zone of Costa Rica*, Dordrecht: Kluwer Academic Publishers.
- Kok K., Veldkamp A., 2001, Evaluating impact of spatial scales on land use pattern analysis in Central America, *Agriculture Ecosystems & Environment* 85(1-3), 205–221. [http://doi.org/10.1016/S0167-8809\(01\)00185-2](http://doi.org/10.1016/S0167-8809(01)00185-2).
- Le Roux A., 2012, Quantifying the spatial implications of future land use policies in South Africa. Reshaping a city through land use modelling. Praca magisterska w ramach programu GIMA, Universiteit Utrecht, TU Delft, Wageningen UR, ITC.
- Lima M.L., Zelaya K., Massone H., 2011, Groundwater vulnerability assessment combining the drastic and Dyna-CLUE model in the Argentine Pampas, *Environmental Management* 47(5), 828–839. <http://doi.org/10.1007/s00267-011-9652-1>,
- Lin Y.P., Lin Y.-B., Wang Y.-T., Hong N.-M., 2008, Monitoring and Predicting Land-use Changes and the Hydrology of the Urbanized Paochiao Watershed in Taiwan Using Remote Sensing Data, Urban Growth Models and a Hydrological Model, *Sensors*, 8(2), 658–680. <http://doi.org/10.3390/s8020658>,
- Lin Y.P., Verburg P.H., Chang C.R., Chen H.Y., Chen M.H., 2009, Developing and comparing optimal and empirical land-use models for the development of an urbanized watershed forest in Taiwan, *Landscape and Urban Planning*, 92(3-4), 242–254. <http://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2009.05.003>
- Lippe M., 2015, Simulating the impact of land use change on ecosystem functions in data-limited watersheds of Mountainous Mainland Southeast Asia (Vol. 100).
- Liu M., Hu Y., Chang Y., He X., Zhang W., 2009, Land use and land cover change analysis and prediction in the upper reaches of the minjiang river, China, *Environmental Management* 43(5), 899–907. <http://doi.org/10.1007/s00267-008-9263-7>.
- Liu M., Hu Y., Zhang W., Zhu J., Chen H., Xi F., 2011, Application of land-use change model in guiding regional planning: A case study in Hun-Taizi River watershed, Northeast China, *Chinese Geographical Science*, 21(5), 609–618. <http://doi.org/10.1007/s11769-011-0497-6>.
- Liu M., Li C., Hu Y., Sun F., Xu Y., Chen T., 2014, Combining CLUE-S and SWAT models to forecast land use change and non-point source pollution impact at a watershed scale in Liaoning Province, China, *Chinese Geographical Science*, 24(5), 540–550. <http://doi.org/10.1007/s11769-014-0661-x>.

- Lourdes L., Karina Z., Pedro L., Héctor M., Néstor M., 2011, A dynamic simulation model of land cover in the Dulce Creek Basin, Argentina, *Procedia Environmental Sciences*, 7, 194–199. <http://doi.org/10.1016/j.proenv.2011.07.034>.
- Luo G., Yin C., Chen X., Xu W., Lu L., 2010, Combining system dynamic model and CLUE-S model to improve land use scenario analyses at regional scale: A case study of Sangong watershed in Xinjiang, China, *Ecological Complexity*, 7(2), 198–207. <http://doi.org/10.1016/j.ecocom.2010.02.001>.
- Mas J.F., Kolb M., Paegelow M., Camacho Olmedo M.T., Houet T., 2014, Inductive pattern-based land use/cover change models: A comparison of four software packages, *Environmental Modelling and Software*, 51, 94–111. <http://doi.org/10.1016/j.envsoft.2013.09.010>.
- Mehdi B.B., Ludwig R., Lehner B., 2012, Determining agricultural land use scenarios in a mesoscale Bavarian watershed for modelling future water quality, *Advances in Geosciences*, 31, 9–14. <http://doi.org/10.5194/adgeo-31-9-2012>.
- Moulds S., Buytaert W., Mijic A., 2015, An open and extensible framework for spatially explicit land use change modelling: the lulcc R package. *Geosci. Model Dev.*, 8, 3215–3229. [www.geosci-model-dev.net/8/3215/2015/](http://www.geosci-model-dev.net/8/3215/2015/). doi:10.5194/gmd-8-3215-2015.
- Morin A., Urban J., Adams P.D., Foster I., Sali A., Baker D., Sliz P., 2012, Shining light into black boxes, *Science*, 336, 159–160.
- Oh Y.G., Yoo S.H., Lee S.H., Choi J.Y., 2011, Prediction of paddy field change based on climate change scenarios using the CLUE model, *Paddy and Water Environment*, 9(3), 309–323. <http://doi.org/10.1007/s10333-010-0244-0>.
- Orékan V.O.A., 2007, Implementation of the local land-use and land-cover change model CLUE-s for Central Benin by using socio-economic and remote sensing data, 230.
- Overmars K.P., Helming J., van Zeijts H., Jansson T., Terluin I., 2013, A modelling approach for the assessment of the effects of Common Agricultural Policy measures on farmland biodiversity in the EU27, *Journal of Environmental Management*, 126, 132–141. <http://doi.org/10.1016/j.jenvman.2013.04.008>
- Park J., Park M.-J., Joh H.-K., Shin H.-J., Kim S.-J., 2010, Land Use Change Impacts on Watershed Hydrology using SWAT [w:] 2010 SWAT Korea, Konkuk University.
- Parshotam A., Elliott S., Shankar U., Wadhwa S., 2013, National nutrient mapping using the CLUES model. <http://www.pce.parliament.nz/media/1276/national-nutrient-mapping-using-the-clues-model.pdf>
- Pebesma, E. J., Nüst, D., and Bivand, R., 2012, The R software environment in reproducible geoscientific research, *EOS T. Am. Geophys. Un.*, 93, 163–163.
- Pérez-Soba M., Verburg P.H., Koomen E., Hilferink M., Benito P., Lesschen J.P., Banse M., Wojtjer G., Eickhout B., Prins A.-G., Staritsky I., 2010, Land use modelling — implementation. Preserving and enhancing the environmental benefits of “land-use services”, Wageningen. Final report to the European Commission, DG Environment. Alterra Wageningen UR, Geodan, Object Vision, BIOS, LEI and PBL.
- Pontius R.G., Cheuk, M.L., 2006, A generalized cross-tabulation matrix to compare soft-classified maps at multiple resolutions, *International Journal of Geographical Information Science*, 20, 1–30.
- Pontius R.G., Schneider L.C., 2001, Land use change model validation by an ROC method for the Ipswich watershed. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 85, 239–248.

- Price B., Kienast F., Seidl I., Ginzler C., Verburg P. H., Bolliger J., 2015, Future landscapes of Switzerland: Risk areas for urbanisation and land abandonment, *Applied Geography*, 57, 32–41. <http://doi.org/10.1016/j.apgeog.2014.12.009>.
- Promper C., Puissant A., Malet J. P., Glade T., 2014, Analysis of land cover changes in the past and the future as contribution to landslide risk scenarios, *Applied Geography*, 53, 11–19. <http://doi.org/10.1016/j.apgeog.2014.05.020>.
- Renwick A., Jansson T., Verburg P. H., Revoredo-Giha C., Britz W., Gocht A., Revoredo-Giha C., 2011, Policy reform and agricultural land abandonment, *Land Use Policy*, 30(1), 446–457.
- Santini M., Valentini R., 2011, Predicting hot-spots of land use changes in Italy by ensemble forecasting, *Regional Environmental Change*, 11(3), 483–502. <http://doi.org/10.1007/s10113-010-0157-x>.
- Schoorl J.M., Veldkamp A., Fresco L.O., 1997, The conversion of land use and its effects (CLUE-CR), a regression based model applied to Costa Rica (Pascal version 1.2). Quantitative, *Approaches Syst. Anal.*, 8, 1–53.
- Steiniger S. and Hunter A. J., 2013, The 2012 free and open source GIS software map – a guide to facilitate research, development, and adoption, *Comput. Environ. Urban.*, 39, 136–150, doi:10.1016/j.compenv.urbansys.2012.10.003.
- Stürck J., Schulp C.J.E., Verburg P.H., 2015, Spatio-temporal dynamics of regulating ecosystem services in Europe – The role of past and future land use change, *Applied Geography*, 63, 121–135. <http://doi.org/10.1016/j.apgeog.2015.06.009>
- Sun X., Yue T., Fan Z., 2012, Scenarios of changes in the spatial pattern of land use in China, *Procedia Environmental Sciences*, 13(2011), 590–597. <http://doi.org/10.1016/j.proenv.2012.01.050>
- Trisurat Y., Alkemade R., Verburg P.H., 2010, Projecting land-use change and its consequences for biodiversity in Northern Thailand, *Environmental Management*, 45(3), 626–639. <http://doi.org/10.1007/s00267-010-9438-x>
- van Soesbergen A., 2015, A review of land-use change models. UNEP World Conservation Monitoring Centre. [https://www.researchgate.net/profile/Arnout\\_Van\\_Soesbergen/publication/308515089\\_A\\_review\\_of\\_land\\_use\\_change\\_models/links/57e5476108aee6b716c89395.pdf?inViewer=0&pdfJsDownload=0&origin=publication\\_detail](https://www.researchgate.net/profile/Arnout_Van_Soesbergen/publication/308515089_A_review_of_land_use_change_models/links/57e5476108aee6b716c89395.pdf?inViewer=0&pdfJsDownload=0&origin=publication_detail)
- Trisurat Y., Duengkae P., 2011, Consequences of land use change on bird distribution at Sakaerat Environmental Research Station, *Journal of Ecology and Field Biology*, 34(2), 203–214. <http://doi.org/10.5141/JEFB.2011.022>.
- Veldkamp A., Fresco L.O., 1996a, CLUE: a conceptual model to study the Conversion of Land Use and its Effects, *Ecological Modelling*, 85(2-3), 253–270.
- Veldkamp A., Fresco L.O., 1996b, CLUE-CR: an integrated multi-scale model to simulate land use change scenarios in Costa Rica, *Ecological Modelling*, 91, 231–248.
- Verburg P.H., 2010, The CLUE Modelling Framework. Course material, Institute for Environmental Studies, University of Amsterdam.
- Verburg P.H., Bakker M., Overmars K.P., Staritsky, I., 2008a, Landscape level simulation of land use change, Sustainability Impact Assessment of Land Use Changes, 211–227. [http://doi.org/10.1007/978-3-540-78648-1\\_11](http://doi.org/10.1007/978-3-540-78648-1_11)
- Verburg P.H., Chen Y., 2000, Multiscale characterization of land-use patterns in China, *Ecosystems*, 3(4), 369–385. <http://doi.org/10.1007/s100210000033>

- Verburg P.H., de Koning G.H.J., Kok K., Veldkamp A., Bouma J., 1999a, A spatial explicit allocation procedure for modelling the pattern of land use change based upon actual land use, *Ecological Modelling*, 116(1), 45–61. [http://doi.org/10.1016/S0304-3800\(98\)00156-2](http://doi.org/10.1016/S0304-3800(98)00156-2)
- Verburg P.H., Eickhout B., Meijl H., 2008b, A multi-scale, multi-model approach for analyzing the future dynamics of European land use, *Annals of Regional Science*, 42(1), 57–77. <http://doi.org/10.1007/s00168-007-0136-4>
- Verburg P.H., Lesschen J., b.d., Practical : Explorative modeling of future land use for the Randstad region of the Netherlands.
- Verburg, P.H., Overmars K.P., 2007, Dynamic simulation of land-use change trajectories with the CLUE-s model, [w:] *Modelling land-use change*, vol. 1996, 321–335.
- Verburg P.H., Overmars K.P., 2009, Combining top-down and bottom-up dynamics in land use modeling: Exploring the future of abandoned farmlands in Europe with the Dyna-CLUE model, *Landscape Ecology*, 24(9), 1167–1181. <http://doi.org/10.1007/s10980-009-9355-7>
- Verburg P.H., Overmars K.P., Huigen M.G.A., de Groot W.T., Veldkamp A., 2006a, Analysis of the effects of land use change on protected areas in the Philippines, *Applied Geography*, 26(2), 153–173. <http://doi.org/10.1016/j.apgeog.2005.11.005>
- Verburg P.H., Schulp C.J.E., Witte N., Veldkamp A., 2006b, Downscaling of land use change scenarios to assess the dynamics of European landscapes, *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 114(1), 39–56. <http://doi.org/10.1016/j.agee.2005.11.024>
- Verburg P.H., Soepboer W., Veldkamp A., Limpiada R., Espaldon V., Mastura S. S. A., 2002, Modeling the spatial dynamics of regional land use: The CLUE-S model, *Environmental Management*, 30(3), 391–405. <http://doi.org/10.1007/s00267-002-2630-x>
- Verburg P.H., Steeg J.V.D., Schulp, N., 2005, Manual for the CLUE-Kenya application, 1–54. [http://www.trajectories.org/download/CLUE\\_manual.pdf](http://www.trajectories.org/download/CLUE_manual.pdf)
- Verburg P.H., van Berkel D.B., van Doorn A.M., van Eupen M., van den Heiligenberg H. A.R.M., 2010, Trajectories of land use change in Europe: A model-based exploration of rural futures, *Landscape Ecology*, 25(2), 217–232. <http://doi.org/10.1007/s10980-009-9347-7>
- Verburg P.H., Veldkamp A., 2001, The role of spatially explicit models in land-use change research: a case study for cropping patterns in China, *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 85, 177–190.
- Verburg P.H., Veldkamp A., Bouma J., 1999b, Land use change under conditions of high population pressure: the case of Java, *Global Environmental Change*, 9, 303–312.
- Verburg, P.H., Veldkamp A., 2002, European Advanced Study Course Modelling Land Use Change 27 October 2002- 2 November 2002, *Environmental Modeling & Assessment*, <http://doi.org/10.1007/s00267-002-2630-x>.
- Wahren A., Berkhoff K., Herrmann S., Feger K. H., 2010, Building an integrated modeling framework for assessing land-use change and its consequences for areal water balance in mountainous Southwest China, *Advances in Geosciences*, 27, 71–77. <http://doi.org/10.5194/adgeo-27-71-2010>
- Wu C.F., Lin Y.P., Lin S.H., 2011, A hybrid scheme for comparing the effects of bird diversity conservation approaches on landscape patterns and biodiversity in the Shangan sub-watershed in Taiwan, *Journal of Environmental Management*, 92(7), 1809–1820. <http://doi.org/10.1016/j.jenvman.2011.03.001>.

- Wu M., Ren X., Che Y., Yang K., 2015, A Coupled SD and CLUE-S Model for Exploring the Impact of Land Use Change on Ecosystem Service Value: A Case Study in Baoshan District, Shanghai, China, *Environmental Management*, 56(2), 402–419. <http://doi.org/10.1007/s00267-015-0512-2>.
- Xavier J., 2013, Modelling urban expansion spatial patterns: a methodological approach using cellular automata, Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa, 1–10. [https://fenix.tecnico.ulisboa.pt/downloadFile/395145922557/EXTENDED%20ABSTRACT\\_JX.pdf](https://fenix.tecnico.ulisboa.pt/downloadFile/395145922557/EXTENDED%20ABSTRACT_JX.pdf)
- Xu F., 2004, Modelling the spatial pattern of urban fringe. Geo-Information Science, Praca magisterska. ITC, Enschede, Holandia.
- Xu L., Li Z., Song H., Yin H., 2013, Land-use planning for urban sprawl based on the CLUE-S model: A Case study of Guangzhou, China, *Entropy* 15(9), 3490–3506. <http://doi.org/10.3390/e15093490>
- Zhan J. Y., Deng X. Z., Jiang Q., Shi, N., 2007, The application of system dynamics and CLUE-S model in land use change dynamic simulation: a case study in Taips County, inner Mongolia of China. Proceedings of the 2007 Conference on Systems Science, Management Science and System Dynamics: Sustainable Development and Complex Systems, Vols 1-10, (C), 2781–2789.
- Zhang L., Nan Z., Yu W., Ge Y., 2015, Modeling Land-Use and Land-Cover Change and Hydrological Responses under Consistent Climate Change Scenarios in the Heihe River Basin, China, *Water Resources Management*, 29(13), 4701–4717. <http://doi.org/10.1007/s11269-015-1085-9>
- Zheng H. W., Shen G. Q., Wang H., Hong J., 2015, Simulating land use change in urban renewal areas: A case study in Hong Kong, *Habitat International*, 46, 23–34. <http://doi.org/10.1016/j.habitatint.2014.10.008>
- Zheng X.-Q., Zhao L., Xiang W.-N., Li N., Lv L.-N., Yang X., 2012, A coupled model for simulating spatio-temporal dynamics of land-use change: A case study in Changqing, Jinan, China, *Landscape and Urban Planning*, 106(1), 51–61. <http://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2012.02.006>
- Zhou F., Xu Y., Chen Y., Xu C. Y., Gao Y., Du J., 2013, Hydrological response to urbanization at different spatio-temporal scales simulated by coupling of CLUE-S and the SWAT model in the Yangtze River Delta region, *Journal of Hydrology*, 485, 113–125. <http://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.12.040>.

### Summary

Models of land use change (LUCC models) play an important role in understanding the mechanisms of occurrence of changes in land use and are very useful in supporting the various policies directly or indirectly affecting the spatial distribution of land use. In the last 20 years there has been intensive development of LUCC models in connection with the progress in obtaining detailed spatial information about land surface and processing techniques of spatial data. The LUCC models have developed into the models taking into account several forms of land use (so called integrated models) and performing calculations in a regular grid of cells.

An example of a model, that was developed and modified several times over the past 20 years is CLUE framework. In this paper methodological assumptions and parameters of the model, as well as the history of its development and applications are presented.