

## Symulacje zmian pokrycia terenu i użytkowania ziemi z wykorzystaniem modelu agentowego

Simulations of changes in land cover and land use  
with application of agent-based model

**Katarzyna Gięda-Pinas**

Uniwersytet im. Adama Mickiewicza w Poznaniu, Wydział Nauk Geograficznych i Geologicznych,  
Instytut Geoekologii i Geoinformacji

**Słowa kluczowe: modelowanie agentowe, systemy informacji geograficznej (GIS), zmiany pokrycia terenu i użytkowania ziemi, sprzężone systemy naturalne i antropogeniczne, rolnictwo zrównoważone**

Keywords: agent-based modeling, geographical information systems (GIS), land cover and land use changes (LUCC), coupled human and natural systems (CHANS), sustainable agriculture

### Wstęp

Modelowanie środowiska przyrodniczego jest obecnie jednym z najbardziej dynamicznie rozwijających się kierunków badawczych w naukach przyrodniczych (Beven, 2002; Brown, 2006). Wykorzystywane jest do symulacji wielu zjawisk zarówno naturalnych, jak i społeczno-ekonomicznych, przez co odgrywa znaczącą rolę we współczesnym rozwoju GIS i geoinformacji (Zwoliński, 2009). Szczególnie modelowanie zmian pokrycia terenu i użytkowania ziemi stało się jednym z największych i najczęstszych wyzwań w modelowaniu środowiska geograficznego. Zmiany użytkowania związane są ze społecznymi, ekonomicznymi i przestrzennymi przemianami regionów, zwłaszcza będących pod wpływem dynamicznych zmian sektora rolniczego (Valbuena i in., 2010). Przeobrażenia krajobrazu, uwidoczniające się w zmianach pokrycia terenu i użytkowania ziemi na obszarach o dominującym charakterze rolniczym, niosą zarówno negatywne, jak i pozytywne skutki dla funkcjonowania środowiska. Między innymi, mogą prowadzić do wzrostu zanieczyszczeń wody i powietrza w regionie, mogą powodować fragmentację krajobrazów oraz mogą wpływać na funkcjonowanie środowiska przyrodniczego i typ gospodarowania zasobami naturalnymi na danym obszarze (Henle i in., 2008). Ponadto krajobrazy rolnicze, obok regionów intensywnie rozwiniętych turystycznie, są przykładem złożonych systemów przyrodniczo-społecznych (Liu i in., 2007). W literaturze funkcjonuje pojęcie opisujące tego typu środowiska – sprzężone systemy naturalne i antropogeniczne (ang. *coupled human and natural systems* – CHANS) (Liu i in., 2007). W podejściu CHANS dominują badania interdyscyplinarne, oparte na złożonych interakcjach pomiędzy człowiekiem a środowiskiem, dzięki czemu przedmio-

tem opracowania są nie tylko wyodrębnione z systemu elementy przyrodnicze bądź antropogeniczne, ale syntetyczne geoindykatory przemian w środowisku geograficznym (Zwoliński, 1998) jak zmiany pokrycia terenu i użytkowania ziemi. W tego typu złożonych systemach, to właśnie działalność antropogeniczna, a szczególnie rolnicza, kształtuje charakter krajobrazu głównie na obszarach nizinnych. Co ważne w obecnej dobie, zależność środowisko-człowiek to nie tylko działalność jednokierunkowa, to jest eksploatująca i wyczerpująca zasoby środowiska, ale również mająca na celu poprawę jakości środowiska naturalnego, zwłaszcza za sprawą zwiększającej się świadomości ekologicznej Polaków, a także przez wzrost liczby programów ochronnych, podejmujących różnorodne działania wspierające zrównoważone użytkowanie zasobów przyrodniczych oraz ograniczające zagrożenia dla środowiska naturalnego (Gwiazdowicz, 2010).

W celu testowania potencjalnych zmian pokrycia terenu i użytkowania ziemi na obszarach rolniczych wykorzystuje się różne techniki modelowania (modele automatów komórkowych, zmian systemowych ang. *system dynamics*), a jedną z nich, wykorzystaną w tej pracy, jest modelowanie agentowe (ang. *Agent-based modelling* – ABM). Ten typ modelowania wyróżnia podstawowa zasada symulacji zmian w danym systemie, która jest oparta o wybrany proces decyzyjny. Jest to jedna z najnowszych technik geomodelowania, czyli działania opartego na wykorzystaniu i przetwarzaniu danych przestrzennych, przez co ściśle związana jest z systemami informacji geograficznej (Longley i in., 2005). W modelu agentowym, reprezentowany system jest złożony z obiektów i elementów umieszczonych we wspólnej przestrzeni modelu (Ligmann-Zielińska, 2010). Najważniejszą cechą wyróżniającą ten typ modelowania są *agenci*, tj. jednostki decyzyjne modelu (Dzieszko i in., 2013a). Agenci mają zdolność podejmowania indywidualnych decyzji, aby osiągnąć cel zgodny z zaimplementowanym w modelu schematem działania. Metoda ABM umożliwia reprezentowanie wybranych grup społecznych jako indywidualnych jednostek decyzyjnych, podczas gdy środowisko geograficzne jest reprezentowane przez dane przestrzenne. Połączenie tych elementów daje możliwość opisywania, symulowania i analizy zależności pomiędzy grupą decyzyjną a ich środowiskiem (Parker i in., 2003; Matthews i in., 2007). W przypadku niniejszego opracowania grupę decyzyjną stanowią rolnicy wybranego obszaru testowego, a przestrzenią działania modelu jest środowisko geograficzne Pojezierza Gnieźnieńskiego, przedstawione za pomocą mapy typów pokrycia terenu i użytkowania ziemi.

Celem badań jest przedstawienie możliwości wykorzystania modelowania agentowego zintegrowanego z systemami informacji geograficznej w procedurze symulacji zmian pokrycia terenu i użytkowania ziemi, na skutek indywidualnych decyzji rolników. Zatem model agentowy ma posłużyć do odzwierciedlenia potencjalnych zmian zachodzących w środowisku geograficznym, których bezpośrednią przyczyną jest wdrażanie Programu Rolnośrodowiskowego 2007-2013, z którego oferty korzystają rolnicy.

## Założenia modelowania agentowego

Pojezierze Gnieźnieńskie, które posiada ok. 75% powierzchni użytkowanej rolniczo wytypowano jako obszar badawczy. Pomimo tak wysokiego odsetka obszarów rolniczych Pojezierze Gnieźnieńskie wyróżnia się mozaiką typów pokrycia terenu i użytkowania ziemi. W ostatnich kilkunastu latach zaobserwowano tam zmiany powierzchniowe głównych klas pokrycia terenu i użytkowania ziemi. Na podstawie bazy danych Corine Land Cover (1990-

2006) największy spadek na Pojezierzu zaobserwowano w klasie obszarów rolnych, przy jednoczesnym największym wzroście udziału klasy lasów i ekosystemów seminaturalnych. Świadczy to o stopniowym rozwoju krajobrazu w kierunku proekologicznym. Odnotowane zmiany użytkowania, dominujące na Pojezierzu Gnieźnieńskim, stanowiły główną przesłankę podczas tworzenia założeń do budowy modelu. W celu symulacji zmian związanych z ubytkiem gruntów rolnych w dalszej perspektywie czasowej (od roku 2007) wykorzystano założenia oferty Programu Rolnośrodowiskowego ([www.arimr.gov.pl](http://www.arimr.gov.pl)), który promuje rolnictwo zrównoważone (Pawlewicz, Bórawski, 2013).

Korzystając z danych statystycznych o rolnictwie w województwie wielkopolskim i kujawsko-pomorskim, zawartych w opracowaniach i rocznikach statystycznych (GUS, 2013) ustalono, że średnia wielkość działki rolnej na obszarze badawczym wynosi ok. 1 ha (jest to również minimalna wielkość powierzchni rolnej, dla której rolnik przystępujący do Programu Rolnośrodowiskowego, może uzyskać dofinansowanie). Na podstawie danych statystycznych określono także średnią wielkość gospodarstwa rolnego, która w analizowanym obszarze wynosi zaledwie 15 ha.

Wśród najważniejszych założeń budowanego modelu, było wykorzystanie zmian wybranych typów pokrycia terenu i użytkowania ziemi, jako uniwersalnego wskaźnika rozwoju krajobrazu. W tym celu powstała, uszczegółowiona o dostępne dane przestrzenne, mapa typów pokrycia terenu i użytkowania ziemi o rozdzielczości oczka podstawowego wynoszącego 30 m, której baza stanowiła mapa Corine Land Cover z 2006 r. (GIOŚ, 2010). Mapa Corine Land Cover (ze względu na swoją rozdzielczość 100 m) nie zawiera informacji o ciekach, mniejszych zbiornikach lub drogach, stąd potrzeba jej uszczegółowienia. W tym celu wykorzystano dane dodatkowe, które pochodziły z następujących źródeł: Mapa Podziału Hydrograficznego Polski (KZGW, 2007), wektorowa mapa Vmap Level 2 (GUGiK, 2010), baza danych o mokradłach (Zakład Ochrony Przyrody Obszarów Wiejskich IMUZ Falenty, 2006). Ponadto podczas modelowania wykorzystano następujące dane przestrzenne: wektorową warstwę działek rolnych (o powierzchni ok. 1 ha i kształcie kwadratu, dostosowaną do oczek siatki mapy użytkowania), utworzoną dla gruntów rolnych Pojezierza Gnieźnieńskiego, warstwy zawierające granice obszarów Natura 2000 oraz mapy odległości logarytmicznej – od klasy wód (cieków, zbiorników, mokradeł) i od klasy lasów.

Opracowany model stanowi uniwersalne narzędzie badawcze, które może być wykorzystane dla dowolnego fragmentu przestrzeni Pojezierza Gnieźnieńskiego (m.in. jednostek naturalnych, np. zlewni lub jednostek administracyjnych np. gmin). Do szczegółowych analiz na potrzeby tej pracy, wytypowano losowy fragment obszaru Pojezierza o powierzchni 2143,67 ha, będący odzwierciedleniem zróżnicowanej mozaiki typów pokrycia terenu i użytkowania ziemi, w którym dominują grunty rolne i licznie występują obiekty hydrograficzne charakteryzujące obszary pojezierne (rys. 3).

## Sposób działania modelu

Przyjęte założenia modelu nawiązują do interdyscyplinarnego podejścia badawczego CHANS, ponieważ są związane z działalnością rolniczą kształtującą środowisko geograficzne, których podstawę stanowią indywidualne decyzje wytypowanej grupy społecznej. Działalność rolnicza jest ukierunkowana na zrównoważony rozwój środowiska geograficznego, dlatego opracowany model agentowy ma symulować zmiany pokrycia terenu i użytkowania

ziemi, jakie mogą zajść w środowisku na skutek proekologicznej działalności rolniczej. Stworzony model opiera się na dwóch typach podmiotów: agentów decyzyjnych oraz agentów pomocniczych. Agentami decyzyjnymi są *agenci-rolnicy*, którzy korzystają lub nie, z oferty Programu Rolnośrodowiskowego, natomiast agentami pomocniczymi są *agenci-działki\_rolne*, które gromadzą dane o środowisku oraz mogą zmieniać swój typ użytkowania.

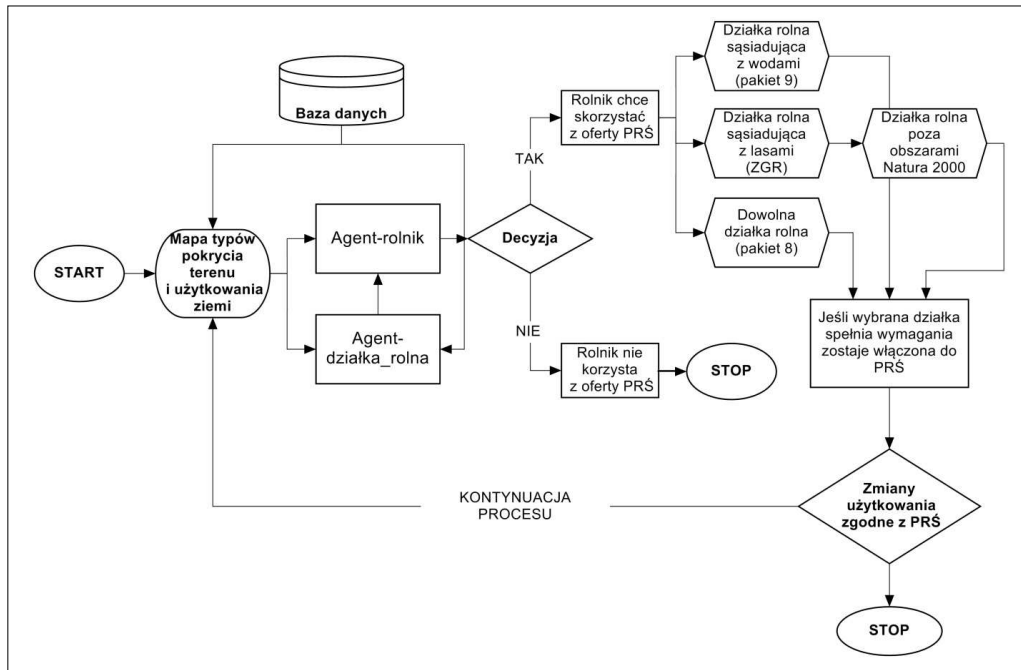
Do sterowania decyzjami *agentów-rolników* wykorzystano Program Rolnośrodowiskowy – PRŚ (Pawlewicz, Bórawski, 2013). Oferta tego programu na lata 2007-2013 zawarta była w dziewięciu pakietach. Udział w poszczególnych pakietach umożliwiał dofinansowanie w ramach dopłat, w celu wsparcia gospodarki rolnej przyjaznej dla środowiska. Do modelowania agentowego wykorzystano dwa pakiety PRŚ: 1) Pakiet nr 8 – Ochrona gleb i wód oraz 2) Pakiet nr 9 – Strefy buforowe.

Dodatkowo wykorzystano ofertę Programu Zalesianie Gruntów Rolnych (ZGR) działającego w ramach Programu Rozwoju Obszarów Wiejskich. Oferty tych pakietów zawierają konkretne możliwości przekształceń gruntów rolnych (np. na las w postaci stref buforowych lub zalesień). Rolnik dobrowolnie przystępujący do PRŚ był zobowiązany do spełnienia konkretnych wymogów (w zależności od wybranego pakietu może to być sąsiedztwo zbiorników wodnych – pakiet 9 lub odpowiednia powierzchnia – m.in. 1 ha gruntów przeznaczonych na przekształcenia – pakiet 8), których zadaniem bezpośrednim (pakiet 9, pakiet 8) lub pośrednim (ZGR) jest ochrona zasobów wodnych przez ograniczenie spływu powierzchniowego ze zlewni. Wspomniane pakiety oferują finansowe wsparcie dla rolników gospodarujących w sposób ekologiczny, co stanowi motywację do podjęcia zobowiązania.

*Agenci-działki\_rolne* mają powierzchnię ok. 1 ha (ze względu na ich umowy kształt – kwadrat, powierzchnia jest pomniejszona) oraz znaną strukturę pokrycia terenu i użytkowania ziemi, którą *agent-rolnik* może zmienić, pod warunkiem spełnienia przez daną działkę wymagań danego pakietu PRŚ oraz wcześniej wyrażonej przez niego samego chęci skorzystania z oferty Programu. Każda działka posiada także atrybuty przestrzenne, czyli informację o położeniu bezwzględnym, o położeniu wobec obszarów Natura 2000 oraz o odległości od wód powierzchniowych (cieków, jezior, mokradeł) i lasów. Informacja o położeniu i otoczeniu danej działki zawarta w warstwach tematycznych stanowi kryterium wykorzystane w procesie decyzyjnym zaprezentowanym w modelu.

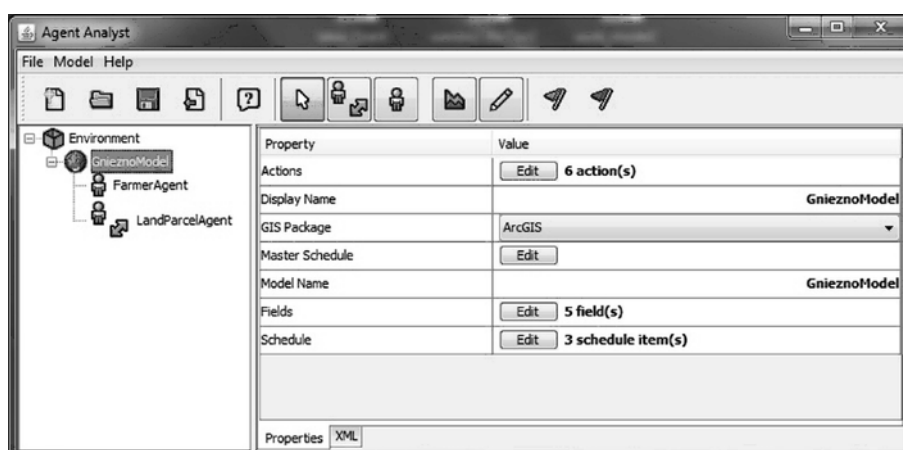
Proces działania modelu rozpoczyna się od włączenia do modelu warstwy wejściowej – mapy typów pokrycia terenu i użytkowania ziemi (rys. 1). Następnie każdy *agent-rolnik* zbiera z warstw tematycznych informację o swoich działkach, podejmując decyzję czy chce uczestniczyć w PRŚ i rozpoczyna cykl związany z wyborem konkretnej oferty. Kolejno sprawdza, która z jego działek rolnych spełnia wymagania danego pakietu (np. czy posiada działki bezpośrednio sąsiadujące z wodami (pakiet 9) lub lasami (ZGR)) i podejmuje ostateczną decyzję środowiskową przypisując wybraną ofertę do konkretnej działki. Każdy rolnik może korzystać z wszystkich ofert, ale dana działka rolna może być przyporządkowana tylko jednej ofercie. Konsekwencją podjętej decyzji i uczestnictwa w PRŚ jest zmiana użytkowania gruntów rolnych na leśne lub użytki trwałe, zmieniająca strukturę typów pokrycia i użytkowania ziemi. W modelowaniu przyjęto, że zmiany mogą zachodzić w przeciągu jednego roku (analogicznie do częstotliwości korzystania rolnika z oferty PRŚ), a zatem za krok czasowy w symulacjach przyjęto 1 rok.

Do tworzenia modelu wykorzystano oprogramowanie ArcGIS 10.1 wraz z kompatybilnym z nim rozszerzeniem do tworzenia modeli agentowych, to jest Agent Analyst (AA). Moduł AA zawiera zestawy narzędzi, które znacznie przyspieszają prace programistyczne,



**Rysunek 1.** Schemat działania decyzyjnego modelu agentowego opartego o proces związany z przystępowaniem rolników do Programu Rolnośrodowiskowego 2007-2013

głównie ze względu na pominięcie kodowania związanego z tworzeniem interfejsu komunikacji z użytkownikiem (Dzieszko i in., 2013b). Moduł AA dostarcza interfejs (rys. 2) oraz co najważniejsze wykorzystuje Repast jako podstawowy zestaw narzędzi, który obok SWARM, MASON i GAMA jest jednym z najpopularniejszych zestawów dostarczających narzędzi do tworzenia i analizowania modeli agentowych (Crooks, Castle, 2012). Zaletą modułu AA jest możliwość wykorzystania do modelowania danych przestrzennych zarówno wektorowych,



**Rysunek 2.** Podstawowe okno dialogowe Agent Analyst utworzonego modelu decyzyjnego

**Tabela 1.** Podstawowe akcje, na których opiera się model decyzyjny

Lp.	Nazwa akcji	Zadanie
1.	Load raster	Włączenie warstw tematycznych do modelu
2.	SetupFishnet	Włączenie warstwy działek rolnych do modelu
3.	SetupFarmer	Utworzenie agentów-rolników, nadanie ID
4.	ModelStep	Główna akcja modelu - schemat postępowania (rys. 2)
5.	UpdateLanduse	Aktualizacja użytkowania po zmianach
6.	UpdateDisplay	Aktualizacja widoku w ArcGIS

jak i rastrowych, co zapewnia włączenie zestawu narzędzi Repast oraz umożliwienie wizualizacji wyników.

Agent Analyst wykorzystuje język Not Quite Python (NQP), który jest podzbiorem języka Python, stosowanym do tworzenia akcji w RepastPy. Moduł Agent Analyst działa na zasadzie akcji, które są two-

rzne zarówno z poziomu modelu, jak i z poziomu konkretnego agenta. W opracowanym modelu agentowym występuje sześć podstawowych akcji opisanych w tabeli 1.

W programie istnieje możliwość tworzenia dwóch typów agentów: 1) *generic agent*, w prezentowanym modelu są to *agenci-rolnicy*, 2) *vector agent* w prezentowanym modelu to *agenci-działki\_rolne*. Cechą charakterystyczną agentów wektorowych jest to, że informacja o ich położeniu i cechach zawarta jest w warstwie wektorowej, co daje możliwość łatwej zmiany tych wartości oraz wprowadzanie dodatkowych cech do tabeli atrybutów, unikając czasochłonnego procesu programowania. Drugi typ agentów (*generic*) nie jest związany z warstwą tematyczną, agenci są tworzeni w modelu przez bezpośrednie programowanie.

Istotną zmienną w powstałym modelu agentowym, która bezpośrednio wpływa na wielkość zmian w krajobrazie, jest liczba rolników przystępujących do Programu Rolnośrodowiskowego. Za pomocą tej zmiennej, modeler wpływa na wyniki symulacji, to jest jakościowe i ilościowe zmiany pokrycia terenu i użytkowania ziemi. Celem niniejszej pracy było: 1) przetestowanie przestrzennego rozkładu zmian typów pokrycia terenu i użytkowania ziemi, 2) przetestowanie zmian ilościowych, jakie pojawiają się w warstwach wynikowych podczas kolejnych symulacji, przy zachowaniu takich samych założeń i identycznych danych wejściowych. Podstawowe statystyki były obliczane dla warstw wynikowych w częstotliwości co 5 symulacji. Symulacje przeprowadzono 35-krotnie dla kroku czasowego (równego 1 rok) przy założeniu, że 100% agentów decyzyjnych modelu jest zainteresowanych ofertą i chce skorzystać z dofinansowania. Podejście rozpatrujące konsekwencje różnych scenariuszy postępowania zaprezentowano w Gięda-Pinas i inni (2015).

## Wyniki symulacji

### Analiza przestrzennego rozkładu zmian

Analizując przestrzenny rozkład zmian, które zaszły w typach pokrycia terenu i użytkowania ziemi na skutek wielokrotnych symulacji, których założeniem było stuprocentowe zainteresowanie ofertą PRŚ, można zaobserwować, że rozkład zmian nie jest jednakowy (rys. 4), pomimo identycznych założeń i danych wejściowych. Oznacza to, że wyniki symulacji różnią się w poszczególnych iteracjach. Dzieje się tak głównie za sprawą zmian zachodzących podczas włączania działek rolnych do Pakietu 8 – Ochrona wód i gleb. Pakiet ten nie ma przestrzennych obwarowań, a udział gruntów, które poszczególne rolnik może włączyć

do PRŚ jest dowolny. Pozwala to, nawet przy stuprocentowym zainteresowaniu ofertą, na pewną losowość zachodzącą w warstwie wynikowej, związaną bezpośrednio z odzwierciedleniem w modelu procesu podejmowania decyzji, który jest ściśle związany z naturą człowieka i który nie zawsze można w prosty i jednolity sposób uzasadnić (przewidzieć lub zaimplementować w modelu). Taki wynik jest pożądanym i niezwykle ważnym w badaniach społecznych i interdyscyplinarnych (Kennedy, 2012) oraz stanowi wyższość modelowania agentowego nad bardziej automatycznymi typami modelowania, na przykład automatami komórkowymi, które umożliwiają jednoznaczne „zaprojektowanie” zmian zachodzących podczas modelowania.

Inaczej rozkład zmian kształtuje się w symulacjach zmian związanych z Pakietem 9 – Strefy buforowe. Przekształcenia powstałe podczas poszczególnych iteracji są w tym przypadku identyczne. Oznacza to, że jeśli *agent-rolnik* posiadał grunty spełniające ściśle kryterium danej oferty (w przypadku pakietu 9 było to sąsiedztwo jezior, mokradeł lub rzek) i wykazał chęć włączenia ich do wybranego programu podczas każdej z przeprowadzonych symulacji, te same działki zmieniały typ użytkowania. Tworzyły się zadrzewione pasy buforowe wzdłuż cieków i zbiorników. Podobna tendencja zmian użytkowania dotyczy kwestii związanych z tworzeniem nowych lasów (program ZGR). Skoro *agent-rolnik* chciał skorzystać z dofinansowania (bo takie były założenia symulacji) czyli wykazał zainteresowanie Programem Zalesianie Gruntów Rolnych, to wówczas grunty użytkowane rolniczo, które znajdowały się w bezpośrednim sąsiedztwie lasów i poza obszarami Natura 2000, zostawały włączone do programu i zmieniały typ użytkowania z rolnego na leśny. Wyjątkiem są sytuacje, w których rolnik postanowił skorzystać w pierwszej kolejności z Pakietu 8, w bezpośrednim sąsiedztwie lasów. Wówczas działka rolna nie mogła być przeznaczona na inny pakiet, stąd niewielkie różnice w przestrzennym rozkładzie zmian.

### Różnice ilościowe w warstwach wynikowych

W celu przetestowania różnic ilościowych, zachodzących w warstwach wynikowych podczas 35-krotnych symulacji (przy takich samych założeniach modelowania (100% zainteresowania) i identycznych warstwach wejściowych), dla każdego kolejnych 5 warstw wynikowych obliczono podstawowe statystyki, które zawiera tabela 2. Typy użytkowania, które nie uległy zmianie podczas symulacji (ponieważ rolnicy korzystający z PRŚ nie mają na nie wpływu podczas korzystania z programu), to tereny wodne i podmokłe oraz tereny antropogeniczne (dlatego nie są uwzględnione w tabeli). Zmiany zaszły pomiędzy następującymi typami użytkowania: lasy, grunty rolne, użytki trwałe.

**Klasa lasy.** Biorąc pod uwagę zmiany, jakie zaszły w poszczególnych warstwach wynikowych (wyniki odnoszą się do oczek siatki warstwy rastrowej typów pokrycia terenu i użytkowania ziemi) w klasie lasy można stwierdzić, że nie ma znacznych odchyłeń pomiędzy obliczonymi statystykami, zwłaszcza wartości minimalne i maksymalne szczególnie analizowanych grup są zbliżone. Biorąc pod uwagę jedynie 5 warstw wynikowych, wartości te znajdują się w przedziale od 7933 do 7961, dla 20 warstw są to wartości od 7916 do 7973, natomiast przy 35 warstwach są to wartości w przedziale od 7915 do 7973. Bardziej zauważalne zmiany przedstawiają mediana i odchylenie standardowe, ich wartości rosną proporcjonalnie do liczby analizowanych warstw (wyjątkiem jest odchylenie standardowe przy 20 warstwach wynikowych). W celu porównania otrzymanych średnich dla grup warstw wynikowych o różnych liczebnościach (5 i 35) przeprowadzono test różnic między średnimi. Poziom istotności testu sprawdzającego jednorodność wariancji przyjmuje wartość mniejszą

**Tabela 2.** Podstawowe statystyki warstw wynikowych, dla 3 typów pokrycia terenu i użytkowania ziemi, które ulegają przekształceniom podczas symulacji (na podstawie ilości oczek siatki)

Warstwa wejściowa	Liczba warstw wynikowych	Podstawowe statystyki – warstwy wynikowe				
		min	mediana	średnia	max	odch. std
Lasy 7219	5	7933	7937,0	7943,6	7961	12,6412
	10	7924	7935,5	7939,5	7961	12,0485
	15	7916	7934,0	7936,8	7961	13,8986
	20	7916	7938,5	7940,0	7973	15,2626
	25	7916	7940,0	7939,8	7973	13,7477
	30	7915	7940,0	7939,5	7973	14,8782
	35	7915	7941,0	7940,6	7973	15,2166
Użytki trwałe 6772	5	13 166	13 241,0	13 229,8	13280	45,8279
	10	13 019	13 246,5	13 238,6	13398	100,8433
	15	13 019	13 252,0	13 260,8	13427	102,4874
	20	12 974	13 243,5	13 227,6	13427	120,4690
	25	12 834	13 205,0	13 178,8	13427	153,9359
	30	12 834	13 238,0	13 203,2	13480	161,0677
	35	12 834	13 241,0	13 212,2	13480	152,5809
Grunty rolne 14 573	5	7353	7381,0	7395,8	7470	45,2073
	10	7237	7390,5	7393,0	7595	96,0139
	15	7196	7381,0	7373,8	7595	100,5295
	20	7196	7401,0	7403,2	7649	116,5805
	25	7196	7403,0	7438,5	7800	157,2469
	30	7114	7401,0	7416,7	7800	163,7914
	35	7114	7381,0	7408,5	7800	155,8460

od 0,05, zatem analizowane są wyniki dla wariacji niejednorodnych, dla których prawdopodobieństwo  $p = 0,323$ , co wskazuje, że nie ma podstaw do odrzucenia hipotezy zerowej o równości średnich.

**Klasa użytki trwałe.** Rozpiętości pomiędzy poszczególnymi analizowanymi grupami warstw wynikowych są znacznie większe niż w klasie lasy. Jest to związane z opisanym wcześniej charakterem zmian tej klasy i bezpośrednim związkiem z procesem podejmowania decyzji przez człowieka. Wartości minimalne i maksymalne dla 5 warstw znalazły się w przedziale 13166-13280, w grupie 20 warstw wynikowych od 12974 do 13427, natomiast dla 35 warstw od 12834 do 13480. Im więcej warstw jest brane pod uwagę, tym większa jest zmienność liczby oczek siatki w klasie użytki trwałe, o czym świadczy także znaczny wzrost odchylenia standardowego. Natomiast porównując otrzymane średnie na podstawie testu różnic między średnimi, otrzymano wynik wskazujący, że w przypadku klasy użytki trwałe poziom istotności testu sprawdzającego jednorodność wariacji przyjmuje wartość mniejszą od 0,05, zatem analizowane są wyniki dla wariacji niejednorodnych, a prawdopodobieństwo  $p = 0,299$ , podobnie jak w przypadku klasy lasy nie ma podstaw do odrzucenia hipotezy, że średnie wartości zmiennej w porównywanych grupach nie różnią się.



**Klasa grunty rolne.** Porównując podstawowe statystyki warstw wynikowych w tej klasie można zauważyć wyraźne różnice w wartości odchylenia standardowego dla kolejnych grup warstw. Najmniejsza wartość odchylenia związana jest z grupą 5 warstw wynikowych i stopniowo rośnie aż do grupy 30 warstw, po czym wartość ta maleje. Co ciekawe mediana jest identyczna dla grupy 5 i 35 warstw. Wynik testu różnic między średnimi kształtuje się następująco: poziom istotności testu sprawdzającego jednorodność wariancji przyjmuje wartość mniejszą od 0,05, a analizowane wyniki dla wariancji niejednorodnych, dla których prawdopodobieństwo  $p = 0,323$ , wskazują, że nie ma podstaw do odrzucenia hipotezy zerowej o równości średnich.

### Zależności zmian w warstwach wynikowych

W celu przetestowania zależności zmian, zachodzących w poszczególnych typach pokrycia terenu i użytkowania ziemi warstw wynikowych, przeprowadzono analizę korelacji dwóch zmiennych dla poszczególnych grup warstw wynikowych. Uzyskany współczynnik korelacji Pearsona utrzymywał się na poziomie istotności poniżej 0,05 jedynie w przypadku klas użytki trwałe i grunty rolne, co wskazuje na istnienie zależności między tymi dwiema zmiennymi we wszystkich grupach warstw wynikowych. Współczynnik korelacji przyjmuje w tym przypadku wartości ujemne (-0,91) co oznacza, że wraz ze wzrostem wartości jednej zmiennej (liczby oczek siatki w klasie użytki trwałe) następuje systematyczny spadek wartości drugiej zmiennej, czyli liczby oczek siatki w klasie grunty rolne. Nie zaobserwowano natomiast zależności pomiędzy zmianami zachodzącymi w klasie lasów, w stosunku do klas użytki trwałe i grunty rolne.

### Analiza szczegółowa – ilościowa i przestrzenna

Przeanalizowano także szczegółowy rozkład zmian typów pokrycia terenu i użytkowania dla grupy 10 warstw wynikowych zarówno w układzie ilościowym, jak i rozkładzie przestrzennym. W celu lepszego rozpoznania skali zmienności dane przedstawiono za pomocą wartości procentowych. Podstawowe statystyki dla trzech analizowanych klas zawiera tabela 3.

**Tabela 3.** Charakterystyki statystyczne warstwy wejściowej i warstw wynikowych typów pokrycia terenu i użytkowania ziemi przed i po 10 symulacjach [%]

Warstwa wejściowa		Warstwy wynikowe – charakterystyki statystyczne [%]						
		min	q.d	mediana	średnia	q.g	max	odch. std
Lasy	100	109,77	109,89	109,93	109,98	110,11	110,28	0,1669
Użytki trwałe	100	192,25	195,07	195,61	195,49	196,03	197,84	1,4891
Grunty rolne	100	49,66	50,49	50,71	50,73	50,89	52,12	0,6588

**Klasa lasy.** Jak wynika z tabeli różnice pomiędzy warstwami wynikowymi kolejnych symulacji (zaobserwowane na podstawie wartości minimalnych i maksymalnych) w klasie użytkowania lasy są stosunkowo niewielkie i wynoszą zaledwie 0,84%. Tworzone strefy buforowe są wąskimi pasami lasów, powstającymi jedynie na ściśle określonej przestrzeni – wzdłuż cieków i zbiorników, natomiast powstające zalesienia mają także dość duże ograniczenia (sąsiedztwo lasów, działki rolne poza obszarami Natura 2000), co wpływa na ilościowy udział komórek rastra mapy typów pokrycia terenu i użytkowania ziemi, ulegających zmianie w tym kierunku.

**Klasa użytki trwałe.** Zmiany w obrębie tej klasy w poszczególnych iteracjach są największe (różnica wynosi 5,59%). Rozpiętość zmian związana jest, analogicznie jak w przypadku zmian przestrzennych, z pewną dowolnością *agentów-rolników* w procesie podejmowania decyzji, podczas korzystania z pakietu 8 oraz z największym udziałem tej klasy użytkowania na obszarze testowym po symulacjach. Brak ścisłych restrykcji programowych (PRŚ) sprawia, że nawet przy jednakowych założeniach modelowania i identycznych warunkach wejściowych, wyniki symulacji podczas kolejnych iteracji różnią się. Taki wynik modelowania jest w tym przypadku pożądany i świadczy o właściwym działaniu powstałego modelu agentowego.

**Klasa grunty orne.** Rozkłady zmian w klasie grunty rolne są zgodne z założeniami modelu. Zmiany następują na korzyść typów użytkowania: lasy oraz użytki trwałe. Zmiany te są największe ilościowo, jednak podlegają mniejszym niż użytki trwałe wahaniom w obrębie poszczególnych warstw wynikowych (różnica wynosi 2,46%). Różnice te są bezpośrednio związane z wahaniami w klasie użytki trwałe.

### Mapy wynikowe symulacji

Na podstawie wygenerowanych map obszaru testowego, można stwierdzić zmiany udziału wybranych typów pokrycia terenu i użytkowania ziemi w mapach wynikowych, poszczególnych iteracji (rys. 4). Zgodnie z założeniami modelu agentowego zmiany mają następować jednokierunkowo, jako konsekwencje przystępowania *agentów-rolników* do wybranych pakietów PRŚ (zmniejszające udział gruntów rolnych), co jest zgodne z celem programu, którym jest promowanie rolnictwa proekologicznego. Potencjalne zmiany związane są z ubytkiem terenów rolnych na rzecz lasów i użytków trwałych. Jak wynika z przeprowadzonych symulacji, typ lasy (zadrzewienia) może średnio wzrosnąć o 10,0% w obrębie tej klasy, natomiast użytki trwałe aż o 95,5% – w stosunku do powierzchni tej klasy przed symulacjami. Zmiany udziału lasów są w porównaniu do użytków trwałych niewielkie, ale z przyrodniczego punktu widzenia nawet niewielkie zmiany użytkowania z typu rolnego na leśny w strefach przybrzeżnych, pełnią ważną rolę w ochronie zbiorników przed nadmierną ilością dostających się ze spływem powierzchniowym biogenów i zanieczyszczeń. Największe zmiany powierzchniowe dotyczyły powiększenia się klasy użytków trwałych, które to działanie sprzyja głównie ochronie gleb przed erozją, a w konsekwencji przed degradacją i zubożeniem jej wierzchniej warstwy, a jednocześnie zmniejsza ilość zanieczyszczeń trafiających do wód powierzchniowych.

### Podsumowanie

Opracowany model agentowy pozwolił na przeprowadzenie symulacji zgodnie z założeniami pracy. Zmiany, które zaszły w środowisku geograficznym Pojezierza Gnieźnieńskiego, są zawarte na mapach przedstawiających typy pokrycia terenu i użytkowania ziemi. Są one skumulowane w obrębie trzech klas: grunty rolne, lasy i użytki trwałe. Zachodzące zmiany są odzwierciedleniem potencjalnych przemian krajobrazu w kierunku proekologicznym i są bezpośrednio powodowane przez konsekwencje środowiskowe indywidualnych decyzji rolników. Motywacją do podjęcia działań proekologicznych tej grupy decyzyjnej była oferta funkcjonującego w latach 2007-2013 Programu Rolnośrodowiskowego. Wprowadzenie

w życie działań opartych na rolnictwie zrównoważonym jest w dużym stopniu spowodowane ogólnopolską, a nawet ogólnoeuropejską, kampanią prowadzoną na rzecz rolnictwa proekologicznego. Potencjalne skutki promowanej akcji nie są jeszcze w całości znane, a ich konsekwencje mogą mieć znaczący, długoterminowy wpływ na poprawę jakości środowiska, na co wskazują wyniki niniejszej pracy – zmniejszenie udziału gruntów rolnych na korzyść lasów i użytków trwałych.

Model agentowy opracowany na potrzeby prezentowanej pracy bardzo dobrze nadaje się jako narzędzie do symulacji zmian użytkowania, będących konsekwencją decyzji ludzkich. Model pozwala na przeprowadzenie symulacji dla wybranego fragmentu Pojezierza Gnieźnieńskiego, co czyni go uniwersalnym narzędziem, przystępnym do wykorzystania przez jednostki administracji publicznej (np. gminy, powiaty). Model umożliwia sterowanie natężeniem zmian podczas symulacji za pomocą regulacji zainteresowania ofertą przez *agentów-rolników*, co pozwala symulować zarówno zmiany realne, które mogą zajść w środowisku, jak i potencjalne lub wręcz abstrakcyjne na danym obszarze testowym.

Model typu ABM, jak wskazują na to wyniki, spełnia wymagania pracy utrzymanych w konwencji CHANS, ponieważ może służyć do symulowania konsekwencji decyzji ludzkich, które charakteryzuje element niepewności i nieprzewidywalności. Elementy te są zauważalne w warstwach wynikowych (zwłaszcza dotyczą losowości podczas przystępowania do Pakietu 8 – nierównomierny rozkład działek włączanych do Pakietu 8 Ochrona gleb i wód, pomimo identycznych założeń), a związane są bezpośrednio ze społecznym aspektem interdyscyplinarnych prac utrzymanych w koncepcji CHANS.

Istotną rolę w przeprowadzonych badaniach pełni możliwość włączenia map tematycznych do modelowania. Wykorzystanie GIS w połączeniu z ABM zmniejsza liczbę prac koniecznych do przeprowadzenia podczas modelowania. Dane zawarte w warstwach można w prosty sposób aktualizować, dzięki czemu model będzie przydatny także w przyszłości. Wykorzystanie GIS jest także najlepszym sposobem na odzwierciedlenie charakteru badanego obszaru, przez co może być traktowany zarówno jako laboratorium badawcze (dla celów naukowych), jak i jako narzędzie pracy dla przedstawicieli administracji publicznej.

Symulacje przekształceń typów użytkowania ziemi, zachodzących w krajobrazie Pojezierza Gnieźnieńskiego, przeprowadzone przez modelowanie agentowe zintegrowane z systemami informacji geograficznej pozwalają stwierdzić, że modelowanie tych przekształceń za pomocą analizy geoinformacyjnej może stanowić ważne ogniwo badań interdyscyplinarnych w podejściu badawczym CHANS.

## Literatura

- Beven K., 2002: Towards a coherent philosophy for modelling the environment. The Royal Society. Proc. R. Soc. Lond. A, 458: 2465-2484.
- Brown D.G., 2006: Agent-Based Models. [In:] Geist H. (ed.), The Earth's Changing Land: An Encyclopedia of Land-Use and Land-Cover Change. Greenwood Publishing Group, Westport: 7-13.
- Dzieszko P., Bartkowiak K., Giełda-Pinas K., 2013a: Agenci w modelowaniu agentowym. *Roczniki Geomatyki* t. 11, z. 4(61): 17-23, PTIP, Warszawa, ISSN 1731-5522.
- Dzieszko P., Bartkowiak K., Giełda-Pinas K., 2013b: Modelowanie agentowe – nowoczesna koncepcja modelowania w GIS. *Roczniki Geomatyki* t. 11, z. 4(61): 7-16, PTIP, Warszawa, ISSN 1731-5522.
- Crooks A.T., Castle C., 2012: The Integration of Agent-Based Modeling and Geographical Information for Geospatial Simulation, [In:] Heppenstall A.J., Crooks A.T., See L.M., Batty M. (eds.), *Agent-Based Models of Geographical Systems*, Springer, Dordrecht: 219-252.

- Gielda-Pinas K., Ligmann-Zielinska A., Zwolinski Z., 2015: Simulations of land use/cover changes in lakes catchments due to requirements of agri-environmental programme 2007-2013. W recenzji, *Limnological Review*, ISSN 1642-5952.
- Gwiazdowicz M., 2010: Środowisko przyrodnicze na obszarach wiejskich – zagrożenia i szanse. *Studia BAS* 4(24): 247-272. ISSN 2080-2404.
- Henle K., Alard D., Clitherow J., Cobb P., Firbank L., Kull T., McCracken D., Moritz R.F.A., Niemelä J., Rebane M., Wascher D., Watt A., Young J., 2008: Identifying and managing the conflicts between agriculture and biodiversity conservation in Europe – a review. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 124 (1-2): 60-71, ISSN 0167-8809.
- Kennedy B., 2012: Modeling human behavior in Agent-Based Models. [In:] Heppenstall A.J., Crooks A.T., See L.M., Batty M., (eds.), *Agent-Based Models of Geographical Systems*, Springer, Dordrecht: 167-179.
- Ligmann-Zielinska A., 2010: Agent-based models, [In:] *Encyclopedia of Geography*, SAGE Publications, [http://www.sage-ereference.com/geography/Article\\_n14.html](http://www.sage-ereference.com/geography/Article_n14.html)
- Liu J., Dietz T., Taylor W.W., Carpenter S., Folke C., Alberti M., Redman C., Schneider S.H., Ostrom E., Pell A., Lubchenco J., Ouyang Z., Deadman P., Kratz T., Provencher W., 2007: Coupled human and natural systems. *Ambio: A Journal of the Human Environment* 36 (8): 639-649.
- Longley P.A., Goodchild M.F., Maguire D.J., Rhind D.W., 2005: *Geographical Information Systems and Science*. Wiley, New York.
- Mathews R., Gilbert N., Roach A., Polhill J., Gotts N., 2007: Agent-based land-use models: a review of applications. *Landscape Ecology* 22 (10): 1447-1459. Springer Netherlands. ISSN 1803-2427 (print) ISSN 1805-4196 (on-line).
- Parker D.C., Manson S.M., Janssen M.A., Hoffmann M.J., Deadman P., 2003: Multiagent systems for the simulation of land-use and land-cover change: a review. *Annals of the Association of American Geographers* 93 (2): 314-337.
- Pawlewicz A., Bórawski P., 2013: Realizacja program rolnośrodowiskowego w Polsce. *Roczniki Naukowe Stowarzyszenia Ekonomistów Rolnictwa i Agrobiznesu XV*, 2: 271-276, ISSN 1508-3535.
- Zwoliński Z., 1998: Geoindykatory w badaniach współczesnej dynamiki geosystemów. [W:] Pękała K. (red.), *Główne kierunki badań geomorfologicznych w Polsce. Stan aktualny i perspektywy*. Lublin: 223-227.
- Zwoliński Z., 2009: Rozwój myśli geoinformacyjnej. [W:] Zwoliński Z. (red.), *GIS – platforma geografii*, Bogucki Wyd. Naukowe, Poznań: 9-21.
- Valbuena D., Verburg P.H., Veldkamp A., Bregt A.K., Ligtenberg A., 2010: Effects of farmer's decision on the landscape structure of a Dutch rural region: an agent-based approach. *Landscape and Urban planning*, Springer 97: 98-110, ISSN 0169-2046.

#### Źródła internetowe (dostęp 15.12.2014 r.)

- Baza danych o mokradłach. Zakład Ochrony Przyrody Obszarów Wiejskich IMUZ Falenty. [www.imuz.edu.pl](http://www.imuz.edu.pl)
- Corine Land Cover 2006: Główny Inspektorat Ochrony Środowiska. <http://clc.gios.gov.pl/>
- Dane statystyczne. Główny Urząd Statystyczny [www.stat.gov.pl/](http://www.stat.gov.pl/)
- Wektorowa mapa Vmap Level 2. Główny Urząd Geodezji i Kartografii <http://www.gugik.gov.pl/>

#### Streszczenie

*Modelowanie agentowe (ABM) jest przykładem geomodelowania opartego na wykorzystaniu i przetwarzaniu danych przestrzennych, czyli związanych z systemami informacji geograficznej. Jest to jedna z najlepiej przystosowanych metod służących do modelowania sprzężonych systemów naturalnych i społecznych (CHANS), a zarazem relacji człowiek-środowisko. System odzwierciedlany w modelu agentowym składa się z obiektów i elementów umieszczonych w przestrzeni modelowej, która stanowi modelowy obraz Pojezierza Gnieźnieńskiego, a kluczową rolę w całym procesie odgrywają agenci – jednostki decyzyjne modelu, którymi w omawianym systemie są rolnicy. Opracowany model agentowy służy do symulacji zmian pokrycia terenu i użytkowania ziemi, będących jednym z istotniejszych syntetycznych wskaźników przemian w środowisku geograficznym. Prezentowany model agentowy oparty jest na schemacie działania związanym z przystępowaniem rolni-*

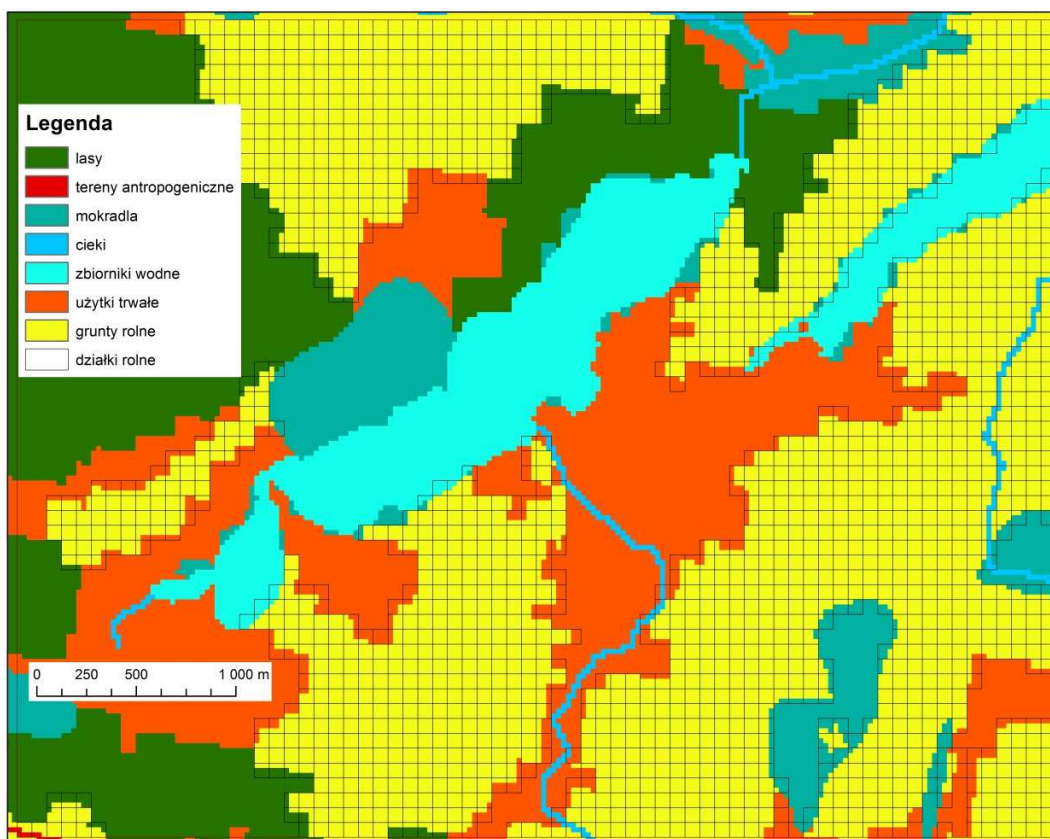
*ków do wybranych pakietów Programu Rolnośrodowiskowego 2007-2013, które wymuszają na nich ściśle określone działania proekologiczne. Model umożliwia modelowanie różnych scenariuszy postępowania rolników, przez co pozwala uzyskać zarówno realne, jak i abstrakcyjne (100% zainteresowania ofertą PRŚ) konfiguracje pokrycia terenu i użytkowania ziemi. Ten sposób modelowania jest szczególnie przydatny w kontekście funkcjonowania środowiska geograficznego opartego o ściśle relacje człowiek-środowisko. Dodatkowo może służyć, jako narzędzie wykorzystywane w procesie wspierania podejmowania decyzji, w prognozowaniu rozwoju środowiska, w planowaniu przestrzennym oraz w ocenie oddziaływania na środowisko.*

### **Abstract**

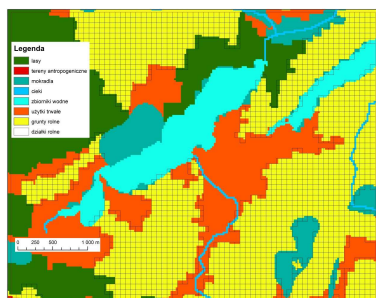
*Agent-based modeling is an example of geomodeling based on spatial data, i.e. the data connected with geographic information systems. Using agent-based modeling makes it possible to simulate functioning of natural systems, social systems or coupled human and natural systems (CHANS). ABM approach is one of the best-adapted methods for modeling coupled social-natural systems due to its characteristic elements – agents. When a system is reflected in the model it is built of objects and elements placed in the model space. A key role in the whole process is played by agents – individual decision-making model entities.*

*The agent-based model developed for this paper is created to simulate changes in land use and land cover and to show the environmental effects of this process, which is one of the most important synthetic indicators in the geographical environment. The model developed can be used for different space scales and it based on the process in which farmers take action participation in selected packages of Agri-environmental Programme 2007-2013, which require them to strictly defined environmental activities. The model allows to simulate different scenarios of implemented decision role, thereby resulting in different, both real and abstract, configurations of land use and land cover patterns. This way of modeling is especially useful in the context of CHANS. It can serve as a tool in supporting decision-making processes, in predicting the environmental changes and development, spatial planning and environmental impact assessment.*

mgr inż. Katarzyna Gielda-Pinas  
kasia\_gp@amu.edu.pl



**Rysunek 3.** Fragment Pojezierza Gnieźnieńskiego – mapa wejściowa obszaru testowego z nałożoną wektorową warstwą działek rolnych (kwadraty o pow. 1 ha)



a

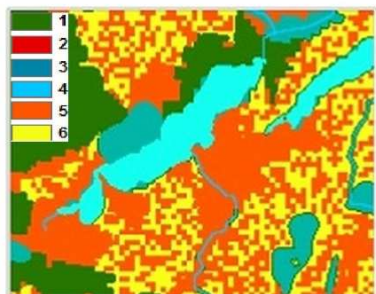
**Rysunek 4.** Fragment Pojezierza Gnieźnieńskiego:

a – mapa wejściowa obszaru testowego,

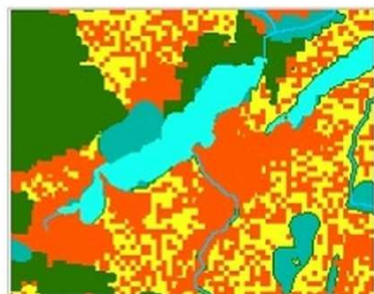
b – przykładowe (wybrane losowo) mapy wynikowe symulacji;

kolory w legendzie: 1 – lasy, 2 – tereny antropogeniczne, 3 – obszary podmokłe,

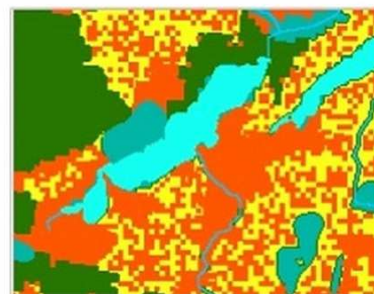
4 – jeziora i ciekі, 5 – użytki trwałe, 6 – grunty rolne



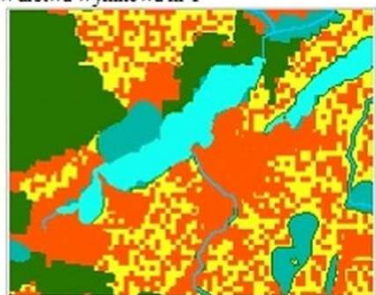
Warstwa wynikowa nr 1



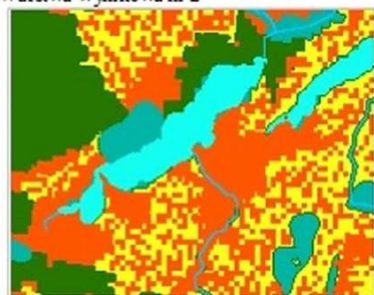
Warstwa wynikowa nr 2



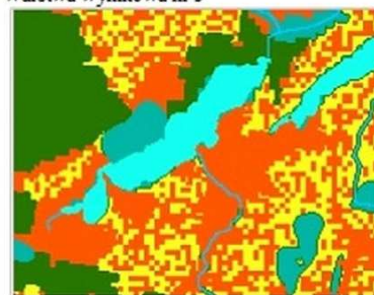
Warstwa wynikowa nr 3



Warstwa wynikowa nr 4



Warstwa wynikowa nr 5



Warstwa wynikowa nr 6

b