

**MODELOWANIE DYNAMIKI ZJAWISK  
W PLANOWANIU PRZESTRZENNYM  
Z WYKORZYSTANIEM ONTOLOGII FORMALNYCH\***

MODELING OF DYNAMIC PHENOMENA IN SPATIAL  
PLANNING WITH THE USE OF FORMAL ONTOLOGY

**Jaromar Łukowicz<sup>1</sup>, Adam Iwaniak<sup>1,2</sup>, Marek Strzelecki<sup>1</sup>,  
Iwona Kaczmarek<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> Uniwersytet Przyrodniczy we Wrocławiu, Instytut Geodezji i Geoinformatyki

<sup>2</sup> Wrocławski Instytut Zastosowań Informatyki Przestrzennej i Sztucznej Inteligencji

**Słowa kluczowe: ontologia, modelowanie, planowanie przestrzenne, Description Logic, ontologia formalna, model czasoprzestrzenny**

Keywords: ontology, modeling, spatial planning, Description Logic, formal ontology, spatio-temporal model

## Wstęp

Gospodarka przestrzenna, w tym planowanie przestrzenne, odnoszą się do dynamicznych zagadnień kształtowania ładu przestrzennego i środowiska. Planiści formułują swoje projekty i przewidywania opierając się na specjalistycznej wiedzy w swojej dziedzinie, własnym doświadczeniu oraz intuicji. Wykorzystywanie systemów GIS dla potrzeb tworzenia scenariuszy rozwoju przestrzennego staje się coraz bardziej powszechne.

W ramach artykułu autorzy prezentują nieco odmienne podejście. Problematyka modelowania zjawisk przestrzennych w gospodarce przestrzennej wykorzystuje szanse wynikające z rozwiązań opartych na technologiach Semantic Web. Pozwalają one na zastosowanie formalizmu logiki opisowej (DL) oraz systemów formalnych, w postaci ontologii fundamentalnych. Systemy te dostarczają konstrukcji logicznych, pozwalających modelować skomplikowane multidyscyplinarne zagadnienia, z uwzględnieniem ich czasoprzestrzennego charakteru.

---

\* Opisane w artykule badania są sfinansowane przez Narodowe Centrum Nauki w ramach projektów UMO-2012/05/N/HS4/00642 i UMO-2012/05/B/HS4/04197.

## Obecny stan wiedzy

**Czasoprzestrzenna reprezentacja w SDI.** Dla danych reprezentujących obiekty lub zjawiska zmieniające się w czasie w sposób ciągły (np. liczba ludności, lesistość, PKB, itp.) używane są serie danych. Pozwalają one na prowadzenie analiz oraz opis charakteru zmian za pomocą dobrze znanych narzędzi statystycznych lub ilustrację tych zmian w funkcji czasu (najczęściej w formie diagramów). Drugim podejściem, odnoszącym się do obiektów trwałych (np. działki, budynki), jest wprowadzenie *historii obiektu*. W najprostszej postaci odbywa się to przez wprowadzenie atrybutów rejestrujących moment powstania oraz (potencjalnie) zniszczenia obiektu (Quak et al., 2011) lub przez jego wersjonowanie (Li et al., 2008). Niekiedy wygodne jest wskazanie obiektów poprzedzających (ang. *predecessors*) oraz ewentualnie, następujących (ang. *successors*) (Berman, 2009; Guangfa et al., 2005).

**Czasoprzestrzenny graf RDF.** Podobne podejście, choć wykorzystujące struktury semantyczne, obejmuje budowanie grafów temporalnych. Do właściwości tworzących relacje grafu dodawane są dodatkowe właściwości definiujące moment (*timeSlice*, czyli *przekrój czasowy*) lub przedział czasowy (*timeInterval*), w którym ten graf był aktualny. Dynamika zjawisk jest więc reprezentowana przez serię grafów, opisujących kolejne momenty lub przedziały czasowe zjawisk (Gutierrez et al., 2007).

**Podejście czasoprzestrzenne w ontologiach wyższego rzędu (ontologiach formalnych).** Szczegółowe omówienie tych rozwiązań jest przedmiotem artykułu. Do zapisu zjawisk dynamicznych w postaci czasoprzestrzennej możliwe jest wykorzystanie m.in. następujących ontologii: DOLCE (Descriptive Ontology for Linguistic and Cognitive Engineering; <http://www.loa.istc.cnr.it/>), OCHRE (Schneider, 2003), BFO (Basic Formal Ontology; <http://www.ifomis.org/bfo>), GFO (General Formal Ontology; <http://www.onto-med.de/ontologies/gfo/>).

**Operatory przestrzenne i temporalne.** Reprezentacja stanu i związków między obiektami może być opisana operatorami. Dla zjawisk opisywanych zarówno w przestrzeni i w czasie, potrzebny jest zespół relacji, które opiszą wzajemne położenie obiektów oraz zależności chronologiczne. Możliwe jest tu wykorzystanie relacji mereologicznych (ontologia Leśniewskiego), mereotopologicznych (A.Tarski), temporalnych (z systemów logik temporalnych, LTL, CTL, CTL\*) (Hahmann, 2013). Dla analiz przestrzennych lub temporalnych stworzono też odrębne „rachunki”: RCC – Region Connection Calculus dla relacji topologicznych (Renz et al., 1999) oraz operatory Allena dla relacji temporalnych (Allen, 1983). Jest też wiele innych koncepcji opisu cech przestrzennych obiektów i ich relacji do innych obiektów: operatory kierunków, azymutów itd. (Gerevini et al., 2002)

## Problemy modelowania dynamicznych zjawisk przestrzennych

Na opis rzeczywistości, składający się ze wzajemnie powiązanych reprezentacji poszczególnych dziedzin, nakładają się procesy zmian. Gdy rozpatrujemy fragment przestrzeni, możemy modelować go jako złożony układ (system), zbudowany z uporządkowanych zbiorów elementów (podsystemy) i relacji między nimi. Zmiany układu można sprowadzić do zapisu zmian poszczególnych elementów. Z opisu struktury systemu będzie wynikać, jak ewolucja

tych elementów wpływa na ich wzajemne relacje (np. oddziaływania). Jak zapisać taką strukturę zaprezentujemy w części poświęconej modelowaniu.

Przekształcenia układu można reprezentować jako zapis kolejnych jego stanów, na które składają się odpowiednie stany elementów. Można więc prześledzić historyczne zmiany w przestrzeni, jako obrazy kolejnych momentów z przeszłości.

Stan systemu przestrzennego można przedstawić jako wektor wartości wszystkich istotnych atrybutów, opisujących obiekty zawarte w badanym układzie. Jednocześnie stan przestrzeni w danym momencie jest reprezentowany przez punkt wyznaczony przez wartości atrybutów-wymiarów w wielowymiarowej przestrzeni fazowej.

W ten sposób historię zmian można przedstawić jako trajektorię w przestrzeni fazowej (rys. 1). W przeszłości istnieje dobrze znana, jedyna trajektoria, którą przebiegała ewolucja układu. Natomiast w przyszłości można przewidywać wiele możliwych scenariuszy. Na rysunku 1 przedstawiona została wiązka możliwych przyszłych trajektorii. W rzeczywistości przewidywane przekształcenia mogą rysować bardziej skomplikowane trajektorie, tworzące struktury drzewiaste z wieloma rozgałęzieniami.

W przypadku statycznej reprezentacji przestrzeni, w chwili gdy dany stan powiązany jest z momentem, w którym dokonano jego rejestracji i poszczególne stany są rejestrowane wraz z upływem czasu, można odtworzyć proces ewolucji układu. Opis historii realizowany jest więc w postaci serii stanów rejestrowanych od jakiegoś momentu w przeszłości po stan aktualny. Takie stany historyczne, odniesione do konkretnych momentów nazywane są migawkami (ang. *snapshots*) lub przekrojami czasowymi (ang. *time slices*). Każda z migawek opisuje zarówno stan atrybutów tych obiektów w danym momencie, jak również ich położenie, kształt i relacje przestrzenne (rys. 2).

Zmiany stanu przestrzeni są skutkiem procesów przekształceń tego układu. Procesy mogą być przedstawiane na różne sposoby. Wartości poszczególnych atrybutów obiektów można prezentować w funkcji czasu. W ten sposób przedstawiona zostaje dynamika jakiegoś obiektu poprzez odzwierciedlenie zmian pojedynczego atrybutu, które są skutkiem jakiegoś procesu lub procesów. Zmiany tego atrybutu są więc odbiciem zachodzących procesów. Można stwierdzić zachowanie tej wielkości w czasie, ale niewiele można powiedzieć o istocie tych procesów, ich liczbie, przyczynach ich powstawania oraz źródle.

Zmiana układu (stanu przestrzeni) wynika z oddziaływań, które generują procesy i odpowiadają za ich charakter. Mogą to być oddziaływania wzajemne, np. pomiędzy elementami zagospodarowania przestrzennego i środowiska naturalnego oraz oddziaływania zewnętrzne. Zewnętrzne oddziaływania mogą być rozumiane dwojako, jako zewnętrzne w stosunku do obszaru geograficznego, stanowiącego przedmiot opracowania oraz zewnętrzne, czyli spoza dziedzin objętych modelem. Jednak rejestracja zmian pojedynczego atrybutu jest tylko biernym odzwierciedleniem tych oddziaływań i charakteru wywołanych nimi procesów. Dodatkowo trudno jednocześnie zanalizować zmiany wielu atrybutów różnych obiektów. Stosowane w tym celu agregacje pozwalają wychwycić zależności, korelacje, które mogą pozwolić na interpretację związków przyczynowo-skutkowych, ale zazwyczaj jest to wnioskowanie oparte na intuicji. Jednocześnie zawsze agregacje powodują utratę informacji.

Prezentacja sekwencji stanów poszczególnych obiektów, zazwyczaj ogranicza się wyłącznie do wartości poszczególnych atrybutów lub ich agregatów w postaci serii danych. Niewykorzystywana jest w wystarczającym stopniu wiedza na temat praw fizycznych, czy też mechanizmów biologicznych, które opisują różne oddziaływania i ich skutki. Istnieją wszakże formuły matematyczne opisujące tego typu związki pomiędzy poszczególnymi,

wzajemnie zależnymi wielkościami. Aby tego typu jednostkowe prawidłowości wbudować w opis złożonego systemu, model powinien uwzględniać wszystkie skomplikowane struktury. Obecnie serie danych, dla poszczególnych zestawów wielkości, są odnoszone do siebie niejako „manualnie”, w odrębnych analizach, prezentowanych tabelarycznie lub w formie diagramów.

W przypadku, gdy analizy przestrzenne dotyczą migawek czasowych, a liczba obiektów i ich atrybutów nie jest zbyt wielka, tradycyjne metodologie oparte na metodach statystycznych i narzędziach GIS są wydajne i zapewniają precyzyjne wyniki. Ograniczenia zaczynają być widoczne w przypadku chęci zobrazowania procesów zmian całych układów przestrzennych, z uwzględnieniem ich wzajemnych relacji. Identyfikacja złożonych związków przyczynowo-skutkowych lub opisanie scenariuszy ewolucji układów przestrzennych staje się wówczas zadaniem bardzo trudnym. W takiej sytuacji ciągle trzeba zdawać się na intuicję doświadczonego eksperta.

## Reprezentacja semantyczna dynamicznego opisu przestrzeni

**Ontologie jako model.** Technologie sieci semantycznych stanowią narzędzia umożliwiające elastyczne modelowanie rzeczywistości. Do opisu zarówno świata fizycznego, jak i problemów abstrakcyjnych (prawnych, społecznych, gospodarczych) wykorzystywane są struktury zwane ontologiami. Słowo ontologia wywodzi się z języka starogreckiego. Fraza  $\tau\omicron\ \text{o}\nu$  znaczy „to co jest”, co można interpretować jako „byt”. Słowo  $\omicron\nu\tau\omicron\zeta$ , użyte w dopełniaczu, odpowiada frazie: „[to co odnosi się do] bytu”. Gruber opisuje to w krótki sposób: Ontologia jest specyfikacją konceptualizacji (*An ontology is a specification of a conceptualization*) (Gruber, 1995). Ontologia opiera się na szczególnym widzeniu świata: zadaje pytania i formułuje odpowiedzi: czym jest byt, jaka jest jego istota oraz jaki tryb przyjmuje jego istnienie (Herre, 2010).

Systemem formalnym, służącym konstruowaniu ontologii w technologiach sieci semantycznych, jest logika opisowa (ang. *Description Logic – DL*). Językiem zapisu ontologii jest OWL (ang. *Web Ontology Language*), bazujący na strukturze języka RDF (ang. *Resource Description Framework*). RDF opiera się na konstrukcji trójek (ang. *triples*), pozwalającej budować grafy powiązań semantycznych, rozszerzalnych w dowolny sposób (rys. 3).

Otwarta, semantyczna metoda modelowania pozwala na adaptację innych systemów logicznych do wzbogacenia reprezentacji zjawisk świata rzeczywistego. Logika opisowa może być uzupełniona o konstrukcje z logik temporalnych, probabilistycznych, rozmytych i innych. Taka elastyczność czyni ją użyteczną do opisu dynamicznych zjawisk, zachodzących w zagospodarowaniu przestrzennym i środowisku naturalnym.

**Rozróżnienie obiektów, według ich zachowania w czasie.** Niemal wszystkie ontologie fundamentalne wprowadzają rozróżnienie między obiektami, będącymi w pewnym uproszczeniu, trwałymi w czasie (ang. *persistent*), zwanymi po angielsku *continuants*, a dziejącymi lub zdarzającymi się w czasie (ang. *occurents*) (Masolo et al., 2003; Grenon et al., 2004). Stosowane są również odpowiednio pojęcia *endurant* i *perdurant*. W niniejszym artykule określenia: *endurant* – kontynuant oraz *perdurant* – okurent są używane wymiennie. *Endurantami* mogą być obiekty fizyczne (budynek, droga, drzewo, rzeka) lub abstrakcyjne. *Perdurantami* są z kolei zdarzenia lub procesy. *Endurant* charakteryzuje fakt, że nie jest

konieczne widzenie go w całym przedziale czasowym, gdyż nawet migawka (ang. *snapshot*) będzie reprezentatywna dla tego obiektu. Natomiast do opisu procesu konieczne jest postrzeganie go w całym przedziale czasowym, w którym on przebiega, gdyż migawka pokaże jedynie jego fragment i nie będzie reprezentatywna dla tego obiektu.

W artykule skupiono się na prezentacji modelu czasoprzestrzennego proponowanego przez ontologię BFO (Basic Formal Ontology wersja 2.0; <http://purl.obolibrary.org/obo/bfo/2012-07-20/bfo.owl>).

## **Basic Formal Ontology (BFO)** – model czasoprzestrzenny

### **Odzwierciedlenie trwałości i zmienności rzeczywistości w konstrukcji hierarchii klas**

W BFO, enduranty określane są jako kontynuanty (ang. *continuants*), a perduranty jako okurenty (ang. *occurents*). BFO definiuje istotną relację między kontynuantami a okurentami. Pozwala ona na modelowanie związków przyczynowo-skutkowych. Okurenty zmieniają stan kontynuantów, ale jednocześnie mogą „dziać się” tylko w powiązaniu z jakimś kontynuantem. Z punktu widzenia logicznego „trwanie” kontynuantów w czasie ma charakter bierny. Natomiast „dzianie się” okurentów i wpływanie na stan kontynuantów nadaje im cechę obiektów „czynnych”. Zmiana stanu kontynuantu zawsze jest wywołana przez jakiś okurent. Okurent jednocześnie nie może istnieć bez jakiegoś kontynuantu – (kontynuant jest nośnikiem okurentu, (Grenon et al., 2004)).

Podział na obiekty trwałe i zmienne w czasie, służy do budowy reprezentacji logicznej rzeczywistości, która zmienia się w czasie (rys. 4). Model ten ma jednak charakter deklarytywny, a nie proceduralny. Tak więc prezentacja zmian w ontologii nie przypomina algorytmu, ale stanowi zbiór reguł i kryteriów klasyfikujących obiekty i procesy oraz relacje między nimi w czterowymiarowej przestrzeni. Część z tych relacji służy do opisu następstwa obiektów oraz wpływu procesów na ich stan.

### **Relacje między endurantami a perdurantami**

Enduranty są silnie związane z trójwymiarową przestrzenią, podczas gdy perduranty opisywane są czasowo lub czasoprzestrzennie. Utrudnia to badanie relacji topologicznych i temporalnych. System formalny BFO tworzy odrębne ontologie dla kontynuantów i okurentów: odpowiednio ontologie *SNAP* i *SPAN*. Ontologia *SNAP* to migawka (ang. *snapshot*) ze stanu rzeczywistości w perspektywie 3-wymiarowej, modelująca wyłącznie kontynuanty, jako tzw. *SNAP entities*. *SPAN* z kolei modeluje okurenty, jako tzw. *SPAN entities*, prezentując ich czasoprzestrzenne granice (perspektywa 4-wymiarowa). Dodatkowe modele stanowią tzw. transontologie.

Transontologia *SNAP-SPAN* pozwala na wnioskowanie logiczne, obejmujące porównywanie stanów rzeczywistości w różnych momentach, migawkach (rys. 5). Głównym zadaniem ontologii *SNAP-SPAN* jest odkrywanie zmian. Odnoszą się one do stanu endurantów i można je podzielić na 3 grupy (Grenon et al., 2004):

1. **Qualitative Change** – zmiany jakościowe, obejmują transformacje, które zachowują ciąg-

głość tożsamości obiektów, ale opisują zmiany jakości (zmiany cech) głęboko wpływające na charakter obiektu. Są to: *Change in determinables*, *Qualitative creation*, *Qualitative destruction*.

2. **Substantial Change** – zmiany substancjalne, które powodują zakończenie istnienia obiektu (szklana kula, która rozbija się o podłogę). Są to: *budding*, *absorption*, *separation*, *unification*.
3. **Spatial and Locational Change** – zmiany przestrzenne i położenia: niekoniecznie musi oznaczać ruch w fizycznym znaczeniu (mogą to być np. zmiany granic jakiegoś państwa).

Konstrukcja, która łączy migawki w ontologii *SNAP-SNAP* jest **genidentity**. Określa ona relację poprzedzania i następstwa obiektów (rodowody obiektów – ang. *filiations*), podobnie jak w tradycyjnych systemach występują poprzednicy i następcy (ang. *predecessors* i ang. *successors*).

Wnioskowanie na temat dynamiki zjawisk w ramach ontologii *SPAN* jest możliwe w ramach jednej ontologii, obejmującej określony przedział czasowy (ang. *time interval*). Operuje ona na okurentach, reprezentowanych jako obiekty *SPAN*, uwzględniając następstwo czasu. Do obiektów *SPAN* zaliczone są przede wszystkim *procesy* i *zdarzenia*. Charakter procesu, np. tempo zmian kontynuantu będącego jego nośnikiem, opisuje obiekt *profil procesu* (ang. *process profile*). Okurentami są również obiekty typu *temporal region* oraz *spatio-temporal region* (Grenon et al., 2004). Te dwa bazowe typy pozwalają na tworzenie całego szeregu złożonych opisów czasoprzestrzeni oraz ich części (ang. *spatio-temporal parts*) (Grenon, 2003). Regiony i części można analizować badając ich relacje mereologiczne i mereotopologiczne. Jednak, gdy trzeba wyjść poza ten przedział, pojawia się trans-ontologia *SPAN-SPAN*.

Związki pomiędzy obiektami trwałymi i procesami realizujące się w czasie, zawarte są w trans-ontologii *SNAP-SPAN* (i analogicznej *SPAN-SNAP*). Podstawową kwestią opisywaną przez tę ontologię jest relacja kontyuant – okurent. Dodatkowo definiowane są relacje *spatial region – temporal region* i *spatial region – spatiotemporal region* opisujące zależności mereologiczne i mereotopologiczne w czterowymiarowej przestrzeni (rys. 6).

Dla każdego kontynuantu ontologia ta tworzy niepowtarzalne powiązanie ze specyficznym okurentem (obiektem *SPAN*), którym jest jego historia życia (ang. *history of life*) wraz z jego początkiem i końcem. Te granice definiują region czasowy (ang. *temporal region*), w którym istnieje obiekt trwały (rys. 7). Relacje poszczególnych kontyuantów jako nośników okurentów, obejmują również zagadnienia wpływu tych drugich na stan kontyuantów. Odnoszą one kontyuanty do procesów i zdarzeń. Do tych relacji *SNAP-SPAN* należy zaliczyć całą rodzinę relacji: *participation*, *initiation*, *termination*, *creation*, *destruction*, *sustenance*, *deterioration*, *facilitation*, *hindrance* i innych (Grenon et al., 2004). Charakter procesu wywołującego zmianę stanu kontynuantu opisany jest przez profil, który opisuje prędkość, tempo lub częstotliwość zmian lub zdarzeń. W tym zakresie profil procesu determinuje zmiany stanu kontynuantu oraz jego historię życia.

### **Przykład zastosowania modelu czasoprzestrzennego BFO dla rzeczywistych danych**

Potrzeba użycia ontologii formalnych jest widoczna, gdy poddaje się modelowaniu rzeczywiste zjawiska leżące na styku wielu dziedzin życia lub nauki. W tym momencie użytecz-

ny byłby wspólny mianownik, opisujący najbardziej ogólne kategorie i relacje, tworzące formalne ramy dla budowy modelu logicznego. Ontologie formalne właśnie usiłują dostarczyć neutralnej definicji takich kategorii, które są wspólne dla wszystkich dziedzin i dyscyplin. Z kolei kategorie charakterystyczne dla określonej dyscypliny będą definiowane w ontologiach dziedzinowych (zwanych również materialnymi).

Nawiązując do charakteru ontologii formalnych, modelowanie konkretnych zjawisk będzie odbywało się na poziomie ontologii dziedzinowej. Ontologia formalna w tym kontekście będzie zastosowana jako:

- 1) wzorzec do tworzenia ontologii dziedzinowych, dostarczający hierarchię klas i właściwości najwyższego poziomu,
- 2) narzędzie do wzajemnego mapowania ontologii dziedzinowych (ang. *crossmapping hub*).

Przechodząc do przykładowego zastosowania ontologii BFO, poniżej pokazany zostanie proces modelowania zagadnień gospodarki przestrzennej, w odniesieniu do następujących zasobów:

- kataster gruntowy,
- pokrycie terenu – ontologie umożliwiają opis faktycznego stanu środowiska naturalnego oraz antropomorficznego,
- przeznaczenie terenu (zbiory miejscowych planów zagospodarowania przestrzennego).

Podstawowe obiekty tych zasobów (działki, klasoużytki, jednostki pokrycia terenu, tereny planistyczne) zalicza się do kontynuantów. W BFO stanowią one podklasę *'independent continuant'*, które odzwierciedlają rzeczywiste zjawiska.

Konstruując ontologię dziedzinową dla zagadnień gospodarki przestrzennej, jej hierarchia zostanie zbudowana przez rozszerzenie ogólnych klas zdefiniowanych w BFO do klas opisujących obiekty charakterystyczne dla modelowanych dziedzin.

Przykładem modelowania z wykorzystaniem BFO może być uproszczona analiza zachowania się „lasu”, jako obiektu pokrycia terenu. Ontologię zawierającą model zagadnień przestrzennych dla tego przykładu przedstawiono na rysunku 8. Z punktu widzenia przyrodniczego jest to kompleks roślinności, stanowiący środowisko dla szeregu charakterystycznych populacji roślinnych i zwierzęcych, tworzących biocenozę leśną. Dla uproszczenia przykładu przyjęto, że ten typ pokrycia terenu jest definiowany jako obszar o wysokiej gęstości zadrzewienia. Należy jednak pamiętać, że rzeczywiste warunki przyrodnicze są dużo bardziej złożone i trwałość takiego kompleksu zależy od wielu czynników, jak również stanu poszczególnych jego elementów. Naruszenie równowagi tego ekosystemu spowoduje stopniowe obumieranie lasu.

W naszym uproszczonym modelu, kluczowy dla klasyfikacji będzie spadek gęstości zadrzewienia. Przy osiągnięciu pewnej wartości nie można będzie już mówić o lesie, jako faktycznej formie pokrycia terenu. Tak więc obiekty klasy pokrycia terenów będą posiadały przez cały okres swojego życia, jako część (ang. *member part*) obiekty klasy *'Complex of Trees'*. Jednak nie każdy obiekt klasy *'Complex of Trees'* będzie determinował, że mamy do czynienia z obszarem leśnym. Będzie to tylko taki *'Complex of Trees'*, który będzie posiadał przez cały okres swojego życia, cechę *'high tree density'*. Restrykcja *'has quality at all times' value 'high density of trees'* (wyrażona w Manchester Syntax), zalicza obiekt do klasy *'Dense Complex of Trees'*, podklasy *'Complex of Trees'*. *'Forest'* to klasa obiektów, która posiada kryterium klasyfikacyjne: *'has member part at all times' only 'Dense Tree Complex'*. Wartość *'high density of trees'* jest obiektem klasy *'Density of Trees'*, definiującej obiekty

gromadzące cechy gęstości zadrzewienia: przedziały wartości, jednostki odniesienia liczby drzew do powierzchni itp. (rys. 9). Klasa ta pozwala na przejście od klasyfikacji ilościowej do jakościowej. W prezentowanym modelu przedziały wartości mają ostre granice, jednak w dalszym rozwoju, tego typu cechy jakościowe powinny odnosić się do przedziałów ilościowych, wykorzystując logikę rozmytą.

Jeżeli niekorzystny wpływ otoczenia spowoduje spadek gęstości zadrzewienia, który nie pozwoli zaliczyć jej do wysokiej, las przestanie istnieć, a obszar z nim związany przestanie być obszarem leśnym.

Po określeniu obiektów i ich cech należy zdefiniować to, co odpowiada za dynamikę tych procesów. Kontynuanty są nośnikami okurentów, czyli stan obiektów przestrzennych świata rzeczywistego, podlega zmianom na skutek procesów. Cała atrakcyjność czasoprzestrzennej ontologii polega na uchwyceniu procesu nie tylko w formie statystycznej, ale przede wszystkim w przyczynowo-skutkowej. Charakter procesów, np. ich tempo, opisane są przez okurent *'process profile'*. Może to być rozszerzenie tej klasy np. *'tempo wylesiania'*. Pozwala to określić sposób i siłę oddziaływania okurentu na kontynuant. Tego typu klasy kontynuantów i związanych z nimi okurentów są definiowane przez rozszerzenie ogólnych klas ontologii formalnej, na kategorie charakterystyczne dla modelowanej dziedziny.

Posiadając zdefiniowane procesy i profile procesów można odtworzyć historię zmian stanu obiektów. Gdy zmiany właściwości osiągną stany określone w kryteriach klasyfikacyjnych może dojść do zmiany typu *'qualitative change'* lub *'substantial change'*. Posiadając ontologię SPAN, opisującą procesy w przedziałach czasowych można ekstrapolować fakty ze znanej historii w przyszłość i wnioskować o przyszłych stanach oraz przewidywać nowe fakty, które będą wynikały ze zmian oraz reklasyfikacji obiektów.

Należy zdawać sobie sprawę z ograniczeń takiej procedury. Modelując rzeczywistość z użyciem Description Logic poruszamy się w zdefiniowanym zbiorze istniejących lub jawnie założonych przyszłych indywiduów, obiektów trwałych oraz związanych z nimi procesów. Odkrywanie nowych faktów, które jest przedmiotem wnioskowania (ang. *inference*) dotyczy reklasyfikacji indywiduów, wynikającej ze zmiany ich cech: stanu oraz wzajemnych relacji. Zakres tych zmian i tak będzie dosyć szeroki, aż do ich zniszczenia (ang. *Qualitative destruction*) i w konsekwencji utworzenia nowych obiektów (ang. *Qualitative creation*) włącznie. Jednak poruszamy się tutaj wzdłuż szeregu obiektów wyznaczonych przez ich przekazywaną genealogicznie tożsamość (*genidentity*). Historia i klasyfikacja tych istniejących i przewidywanych obiektów musi być opisana regułami (zdaniem) logicznymi wraz z uwzględnieniem relacji logicznych, topologicznych oraz temporalnych. Nie jest jednak możliwe przewidywanie powstania zupełnie nowych indywiduów, obiektów lub zdarzeń, których nie zarejestrowano, nie zaplanowano lub nie założono, tak jak nie da się przewidzieć powstania w perspektywie wieloletniej nowego, konkretnego podmiotu gospodarczego lub pojawienia konkretnego osobnika, przedstawiciela fauny lub flory. Podobnie rzecz się ma ze zbiorem okurentów – są one powiązane, jako obiekty zależne z kontynuantami i tylko w tym zakresie można analizować ich wpływ na kontynuanty oraz przynależność do określonych zakresów czasoprzestrzennych.

Przy ontologicznym opisie można w tym celu wykorzystać dostępne narzędzia do wnioskowania (ang. *reasoning engines*).



## Wnioski

W zagadnieniach gospodarki przestrzennej podstawowym problemem jest stworzenie struktur, które pozwolą efektywnie reprezentować zachowanie dynamicznych obiektów przestrzennych. Nowe podejście do modelowania zjawisk przestrzennych, wykorzystujące technologie Semantic Web oraz ontologii formalnych, daje nowe elastyczne narzędzia do modelowania. Dzięki nim, stają się dostępne struktury pozwalające na modelowanie czasoprzestrzenne zagadnień związanych z gospodarką przestrzenną i ochroną środowiska. Dają one szansę na obiektywizację procesów prognoz środowiskowych i analizy przyszłych scenariuszy zmian zagospodarowania.

Użyteczność ontologii polega na tym, że w modelu zawarty jest zarówno schemat pojęciowy i logiczny wraz z regułami klasyfikacji (TBox) oraz asercje modelowanych bytów (ABox) z wartościami opisującymi ich cechy charakterystyczne oraz stan. Taki zasób jest więc predestynowany do prowadzenia wnioskowania, służącego odkrywaniu nowych faktów. W tym przypadku, byłyby to związki przyczynowo-skutkowe oraz możliwe konsekwencje procesów, powiązanych z opisywanymi obiektami. Taka analiza jest więc realizowana „wewnątrz” samoopisującego się modelu, który przechowuje w swoim łonie całą logikę i wiedzę o swojej strukturze. Ten aspekt wyróżnia struktury wykorzystujące logikę opisową od obiektowych, czy też relacyjnych, w których wszelkie analizy wymagają patrzenia „z zewnątrz” i aplikowania procedur analitycznych projektowanych poza samą strukturą danych.

## Przyszłe badania

Konsekwencją prowadzonych badań jest wprowadzenie do modeli przestrzennych czynnika prawdopodobieństwa. Prowadząc ekstrapolację procesu, wydaje się niezbędne, aby rozpatrywać przyszłe scenariusze w sposób probabilistyczny. Istnieją tutaj do dyspozycji rozszerzenia języka OWL, takie jak Bayes OWL oraz PR-OWL wykorzystujące konstrukcje sieci bayesowskich (Bayes OWL Reference; <http://www.csee.umbc.edu/~ypeng/BayesOWL/manual/index.html>; PR-OWL: A Bayesian extension to the OWL Ontology Language; <http://www.pr-owl.org>).

Drugą kwestią jest wzajemne przekształcanie reprezentacji ilościowej do jakościowej i na odwrót. Wymaga to sformułowania kryteriów klasyfikacji nie bazujących na arbitralnie przyjętych przedziałach wartości. Dlatego, gdzie jest to możliwe, należy rozważyć zastosowanie „rozmytych” kryteriów klasyfikacji, wykorzystujących struktury tzw. logiki rozmytej (ang. *fuzzy logic*). Operowanie na cechach o charakterze jakościowym umożliwi zastosowanie wnioskowania jakościowego (ang. *qualitative reasoning*), które umożliwi większą efektywność procesu (Renz et al., 1999; Gerevini et al., 2002).

## Literatura

- Allen J.F., 1983: Maintaining knowledge about temporal intervals. *Commun. ACM*, 26(11): 832-843.  
 Berman M.L., 2009: Modeling and Visualizing Historical GIS Data. Harvard University, [http://www.fas.harvard.edu/~chgis/work/docs/papers/CGA\\_Wkshp2009\\_Lex\\_9apr09.pdf](http://www.fas.harvard.edu/~chgis/work/docs/papers/CGA_Wkshp2009_Lex_9apr09.pdf)  
 Bittner T., Donnelly M., Smith B., 2009: A spatio-temporal ontology for geographic information integration. *International Journal of Geogr. Inf. Science*, Vol. 23: 765-798.

- Gerevini A., Nebel B., 2002: Qualitative Spatio-Temporal Reasoning with RCC-8 and Allen's Interval Calculus: Computational Complexity. Proc. 15th ECAI02: 312-316.
- Grenon P., 2003: BFO in a Nutshell: A Bi-categorical Axiomatization of BFO and Comparison with DOLCE, IFOMIS REPORTS.
- Grenon P., Smith B., 2004: SNAP and SPAN: Towards Dynamic Spatial Ontology. *Spat.Cog.Comp.*, Vol. 4: 69-104.
- Gruber T., 1995: What is an Ontology? *International Journal of Human-Computer Studies*, Vol. 43, Issues 4-5: 907-928.
- Guangfa L.I.N., Wanli Huang, Huixian Jiang, Youfei C.H.E.N., 2005: A Methodology of modelling object history oriented to spatio-temporal reasoning. *Proceeds.of the Intern.Symp.on Spatio-temporal Modelling, etc...*, Vol. 2005.
- Gutierrez C., Hurtado C.A., Vaisman A., 2007: Introducing Time into RDF. *IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering*, Vol. 19, No. 2, 207 p.
- Hahmann T., 2013: A Reconciliation of Logical Representations of Space: from Multidimensional Mereotopology to Geometry. [www.cs.toronto.edu/~torsten/publications/Hahmann\\_PhD\\_thesis.pdf](http://www.cs.toronto.edu/~torsten/publications/Hahmann_PhD_thesis.pdf)
- Herre H., 2010: General Formal Ontology (GFO) A Foundational Ontology for Conceptual Modelling. *Media*, Vol. 2, Issue 15: 1-50.
- Li Y.D., Tong X.H., Liu M.L., 2008: A Unified Version-Based Spatio-Temporal Data Model. *Archives*: 103-108.
- Masolo C., Borgo S., Gangemi A., Guarino N., Oltramari A., Schneider L., 2003: The WonderWeb Library of Foundational Ontologies. WonderWeb Deliverable D17, Preliminary Report.
- Quak W., de Vries M., 2011: Topological and temporal modeling in GML. [http://www.gdmc.nl/publications/2005/Topological\\_Temporal\\_Modelling\\_GML.pdf](http://www.gdmc.nl/publications/2005/Topological_Temporal_Modelling_GML.pdf)
- Renz J., Nebel B., 1999: On the complexity of qualitative spatial reasoning: A maximal tractable fragment of the Region Connection Calculus. *Artificial Intellig.*, Vol. 108: 69-123.
- Schneider L., 2003: Designing foundational ontologies. The object-centered high-level reference ontology OCHRE as a case study. *Proceeds. of the 22nd International Conference on Conceptual Modelling*: 91-104.

### Źródła internetowe

- Bayes OWL Reference. <http://www.csee.umbc.edu/~ypeng/BayesOWL/manual/index.html>
- BFO The Basic Formal Ontology (BFO). <http://www.ifomis.org/bfo>
- BFO Basic Formal Ontology wersja 2.0. <http://purl.obolibrary.org/obo/bfo/2012-07-20/bfo.owl>
- DOLCE - Descriptive Ontology for Linguistic and Cognitive Engineering. <http://www.loa.istc.cnr.it/>
- GFO General Formal Ontology (GFO). <http://www.onto-med.de/ontologies/gfo/>
- PR-OWL: A Bayesian extension to the OWL Ontology Language. <http://www.pr-owl.org/>

### Streszczenie

*Zarówno gospodarka przestrzenna jak i planowanie przestrzenne mają charakter multidyscyplinarne oraz odnoszą się do dynamicznie zmieniającej się rzeczywistości. Decyzje projektowe oddziałują na spójność systemu środowiska przyrodniczego. Poprawa jakości zarządzania przestrzenią zależy od wypracowania lepszych metod planowania i przewidywania skutków przekształceń przestrzennych dla środowiska. Takie możliwości dają ontologie oparte na logice opisowej (Description Logic) i związanych z nim systemami wnioskowania. Ontologie mogą być wzbogacane o dodatkowe systemy formalne. Autorzy prezentują sposoby budowania ontologii dziedzinowych dla planowania przestrzennego uzupełnionych przez konstrukcje logiki temporalnej. Jako rezultat, analizy relacji przestrzennych będą rozszerzone o badanie relacji czasowych. Modele czasoprzestrzenne z konstrukcjami logiki temporalnej mogą być przedmiotem wnioskowania wykorzystującego tzw. reasonery (reasoning engines). Czasoprzestrzenne reprezentacje są oferowane przez tzw. ontologie wyższego rzędu, w tym przypadku ontologie fundamentalne (formalne). Do tych ontologii można zaliczyć GFO, BFO, DOLCE, OCHRE i inne. Takie ontologie są użyteczne dla modelowania danych przestrzennych z uwzględnieniem ich dynamiki i zmian. Czynią one możliwe przewidywanie scenariuszy przekształceń przestrzennych i przewidywanie przyszłego stanu zagospodarowania oraz środowiska.*

**Abstract**

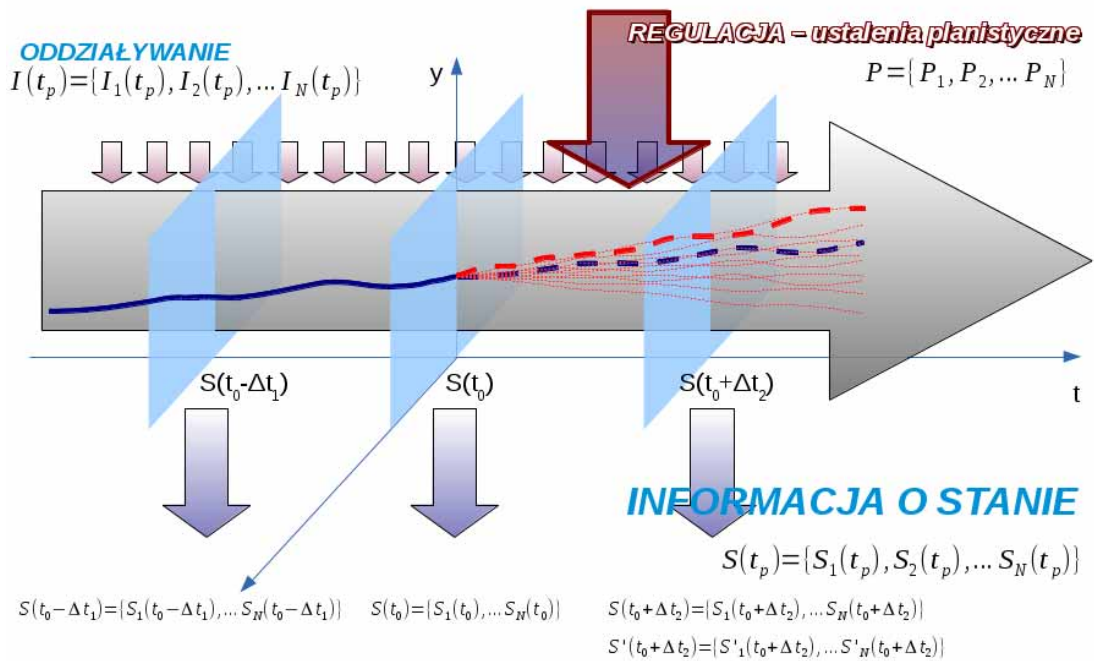
*Spatial management and spatial planning both have a multidisciplinary nature and refer to dynamically changing reality. Design decisions can affect the integrity of the environmental system. Improvement of quality of spatial management depends on developing better methods for planning and forecasting of the environmental effects of development changes. Such possibilities are offered by ontologies, based on Description Logic (DL) and inference systems, which are related to them. Ontologies can be enriched with additional logical systems. The authors present a way of building domain ontologies for spatial planning, supplemented by structures of temporal logic. As a result, the analysis for exploring the topological relations between spatial objects will be extended to include temporal relationships. Spatio-temporal models with temporal logic structures could be a subject of inference process, performed by reasoners (reasoning engines). Spatio-temporal representations are offered by so-called upper ontologies. In this case this is a group of fundamental ontologies such as GFO, BFO, DOLCE, OCHRE and others. Such ontologies are useful for modeling of spatial data regard to their dynamics and changes. They make possible to predict scenarios of expected spatial transformation and forecasting a future state of spatial development and environmental conditions.*

dr inż. Adam Iwaniak  
adam.iwaniak@up.wroc.pl

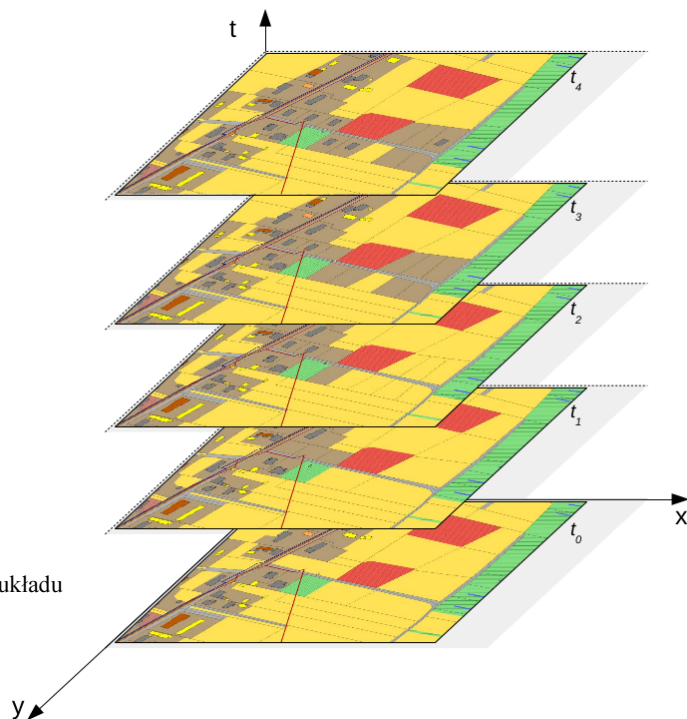
gr inż. Jaromar Łukowicz  
jaromar.lukowicz@struktura.eu

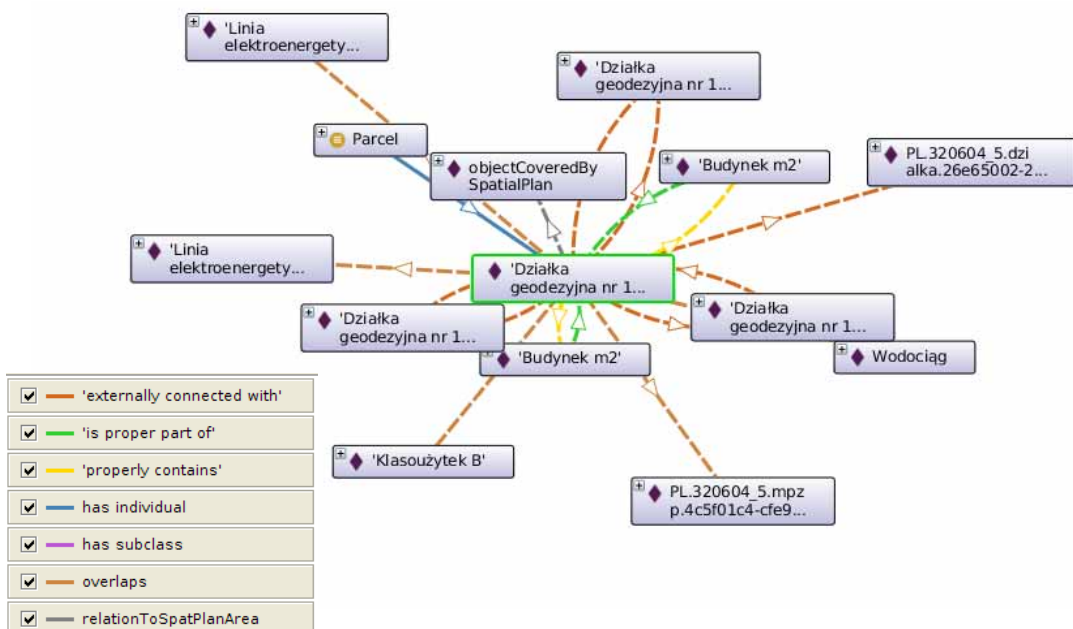
mgr inż. Marek Strzelecki  
marek.strzelecki@up.wroc.pl

mgr inż. Iwona Kaczmarek  
iwona.kaczmarek@up.wroc.pl

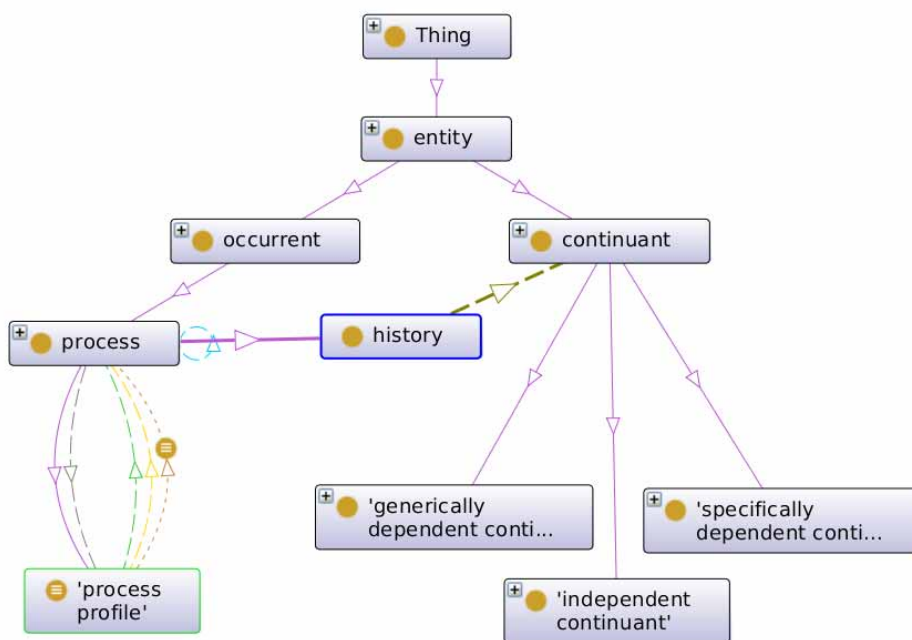


**Rysunek 1.** Ewolucja układu przestrzennego w czasie i jej migawki w poszczególnych momentach;  
 $S(t)$  – zbiór stanów poszczególnych atrybutów obiektów tworzących układ przestrzenny w określonym momencie czasu,  $I(t)$  – zbiór oddziaływań w poszczególnych momentach,  $P$  – zbiór regulacji planistycznych

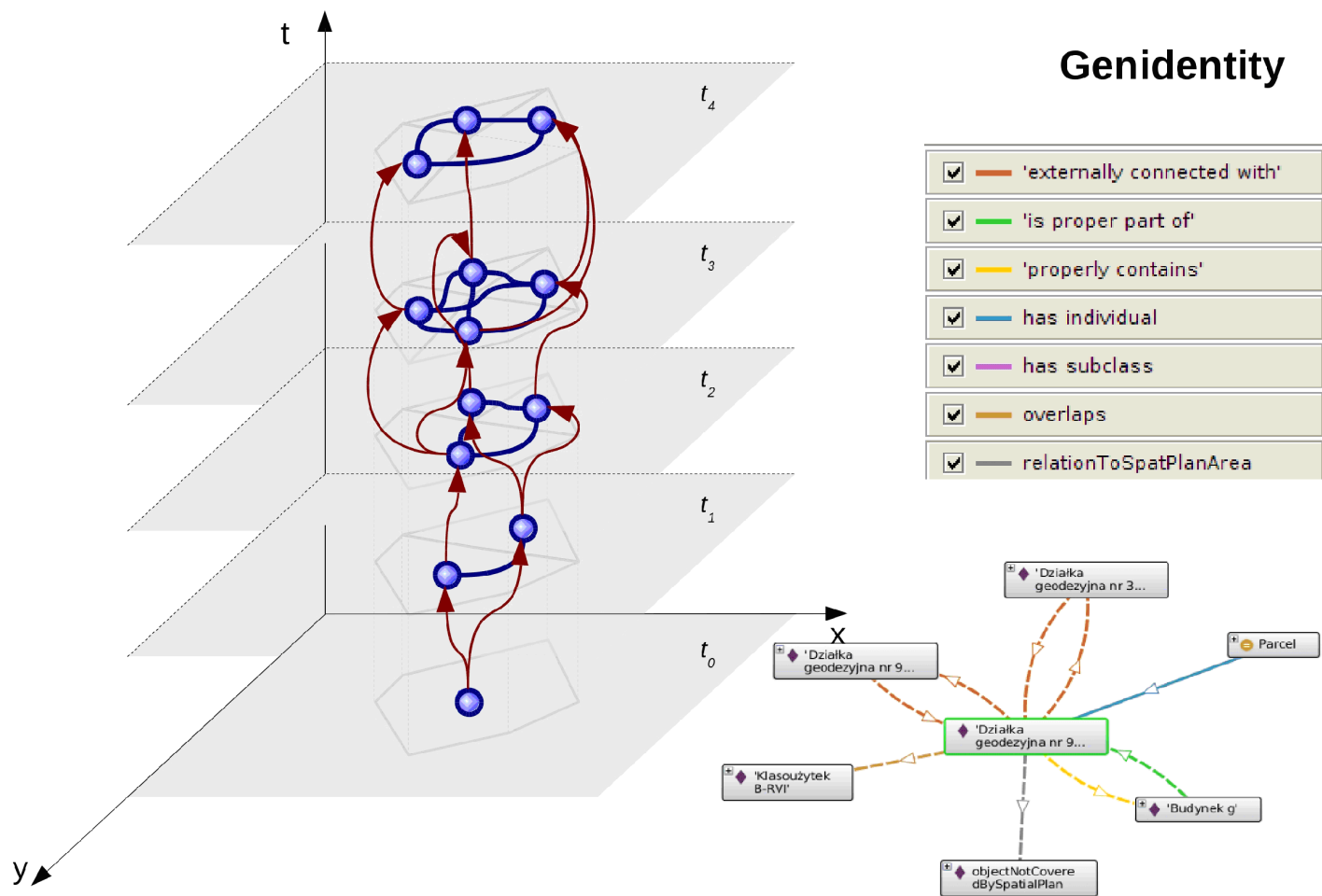




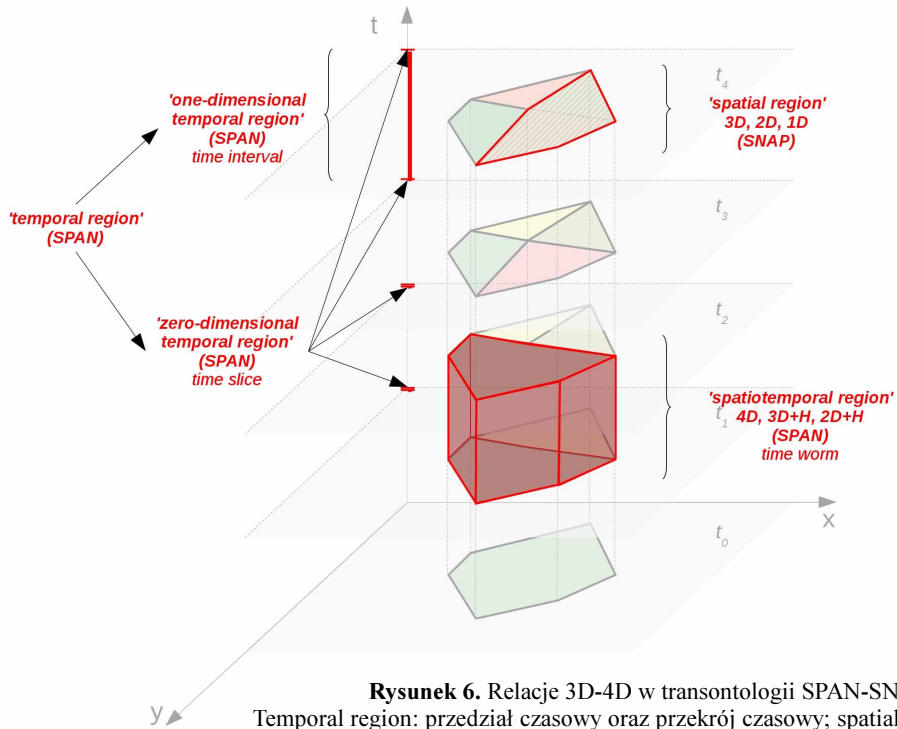
**Rysunek 3.** Graf RDF prezentujący relacje przestrzenne pomiędzy obiektami katastralnymi i planistycznymi (działki, budynki, użytki, obszar planu)



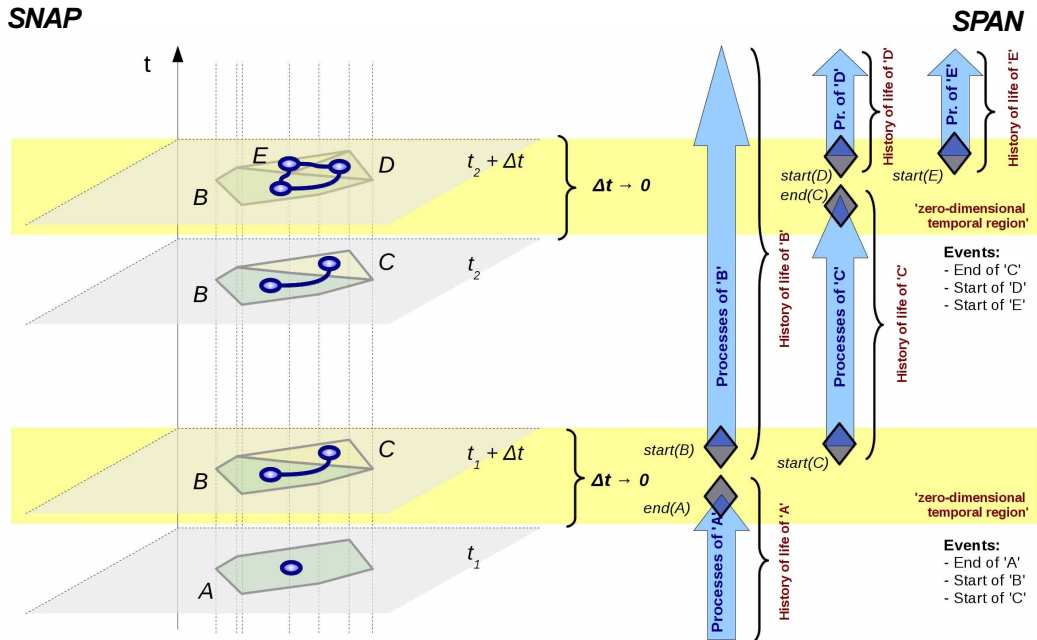
**Rysunek 4.** Obiekty trwałe i zmienne – szczyt hierarchii klas BFO



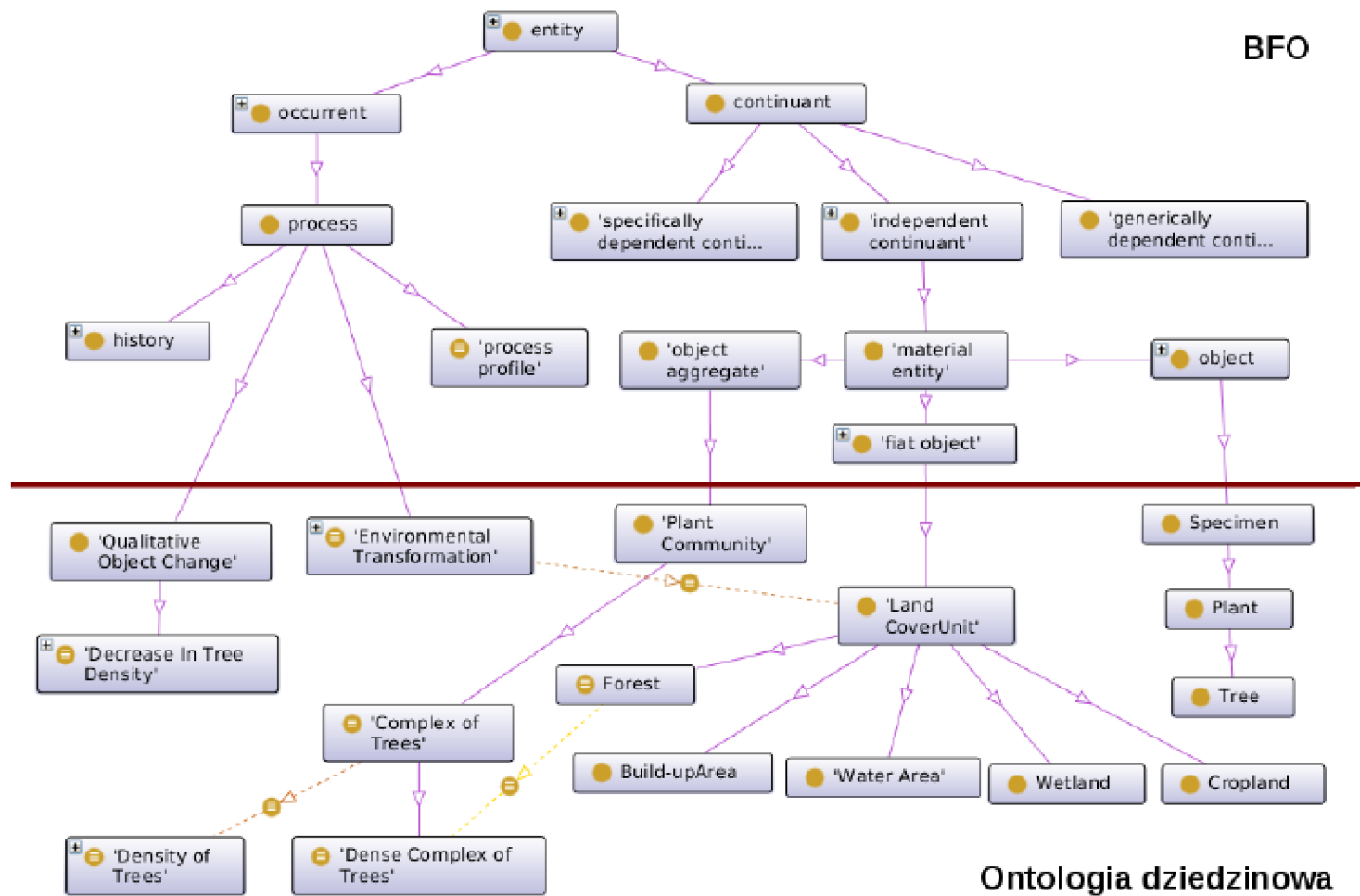
**Rysunek 5.** Idea ontologii SNAP oraz transontologii SNAP-SNAP ( $t_0 - t_n$ : momenty pobrania migawek stanu);  
**Graf relacji** między obiektami, granatowe strzałki (krawędzie grafu) i koła (węzły), reprezentacja relacji:  
 – logicznych (funkcjonalnych), – topologicznych (przestrzennych);  
**Genidentity** – opis pochodzenia (brązowe strzałki łączące obiekty w różnych migawkach)



**Rysunek 6.** Relacje 3D-4D w transontologii SPAN-SNAP;  
 Temporal region: przedział czasowy oraz przekrój czasowy; spatial region – zasięg przestrzenny (3D, 2D, 1D – trój-, dwu-, jednowymiarowy), spatio-temporal region: zasięg czasoprzestrzenny (4D, 3D+H, 2D+H – czterowymiarowy, trój-, dwu-wymiarowy z wymiarem czasu; „time worm” – „robak czasowy”)

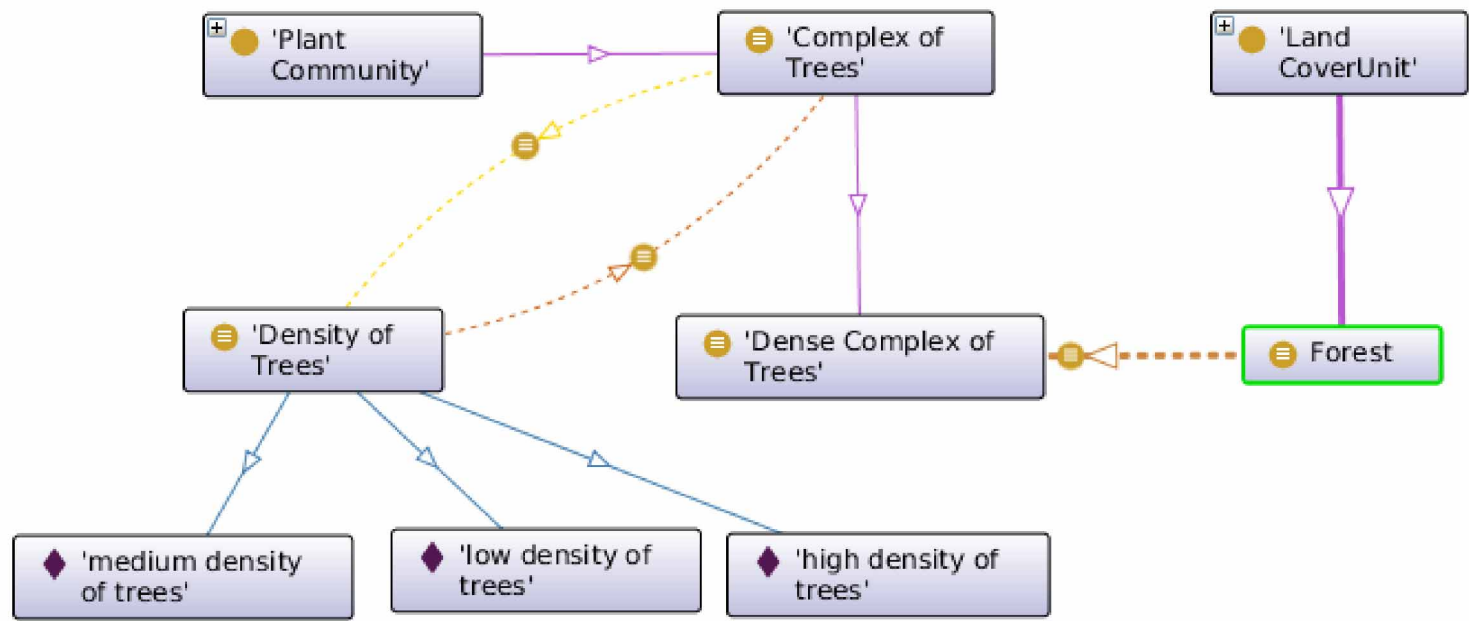


**Rysunek 7.** Historia życia obiektu – procesy oraz zdarzenia i ich wpływ na stan kontynuantu (ontologie SNAP-SPAN); poszczególne obiekty reprezentowane przez węzły opisane są „historią życia”: początek życia obiektu – przekształcenia obiektu / zmiany stanu obiektu (wynik procesów) – koniec życia obiektu



**Rysunek 8.** Przykład ontologii zaprojektowanej do opisu stanu środowiska, w której wykorzystano BFO





- ✓ — 'has member part at all times'(Equivalent class all)
- ✓ — 'has member part at all times'(Equivalent class some)
- ✓ — 'inherits in at all times'(Equivalent class all)
- ✓ — has individual
- ✓ — has subclass

Rysunek 9. Definicja klasy "Forest" w odniesieniu do gęstości zadrzewienia