

КІБЕРНЕТИКА та КОМП'ЮТЕРНІ ТЕХНОЛОГІЇ

УДК 004.9

DOI:10.34229/2707-451X.25.3.7

А.М. КАСІМ, М.М. КАСІМ

ОНТОЛОГІЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ БАЗИ ЗНАТЬ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ ГІС ЦИФРОВОГО ЗЕМЛЕРОБСТВА

Загальна постановка проблеми. Розвиток цифрового землеробства вимагає ефективних методів оперування великими обсягами різномірних даних (агрономічних, метеорологічних, геопросторових, навігаційних тощо), які надходять з різних джерел і систем (агродронів, автономних тракторів, картографічних сервісів, GPS-давачів, IoT-сенсорів, веб-сервісів супутникових знімків, віддалених інформаційних сховищ) та мають різну структуру і рівень деталізації. Традиційні геоінформаційні системи (ГІС) забезпечують базові можливості інтерпретації та аналізу зібраних даних, проте їхнього функціоналу недостатньо для інтелектуальної обробки знань, потрібних, по-перше, для коректного об'єднання даних з різних джерел, а по-друге – для генерації і підтримки прийняття у реальному часі оптимальних рішень на основі даних [1].

Тому у створенні інтелектуальних ГІС важливу роль відіграє спосіб представлення (кодування) знань. Це пояснюється тим, що форма (модель, мова, метод) представлення знань впливає на характеристики і властивості системи. Відсутність єдиної формалізованої моделі знань, яка б інтегрувала релевантні аспекти заданої предметної області (ПрО), ускладнює пошук, обмін і аналіз різномірних даних з урахуванням змісту прикладних задач. Від вибору моделі та мови знань залежить, наскільки ефективно система зможе інтегрувати і семантично обробляти інформацію, ухвалювати рішення та взаємодіяти з користувачем.

Під *представленням знань* розуміють множину синтаксичних і семантичних угод, які уможливають формальне вираження знань про ПрО у комп'ютерно-інтерпретованій формі. Традиційно в цій сфері виділяють чотири основні моделі [2]:

- *логічні моделі* – базуються на математичній логіці (численні висловлювань та предикатів) і дозволяють строго формалізувати знання;

- *продукційні моделі* – використовують правила продукції у форматі «ЯКЩО (умови), ТО (дії)», що дозволяє будувати експертні модулі знань;

Розроблено онтологічну модель бази знань для інтелектуальної ГІС цифрового землеробства, що складається з двох частин: онтології як складної ієрархічної структури даних та блоку її інформаційного наповнення у вигляді самостійної множини індивідів, яка представлена значеннями (семантикою) сенсорних даних. Валідація моделі у середовищі Protege з використанням засобів OWL, RDF та SPARQL показала її спроможність забезпечити семантичну інтерпретацію та інтеграцію різномірних даних, аналіз різних сценаріїв і ситуацій для підтримки прийняття релевантних рішень користувачем системи.

Ключові слова: онтологія, геоінформаційна система, цифрове землеробство, Protege, OWL, RDF, SPARQL, база знань, семантика.

© А.М. Касім, М.М. Касім, 2025

- *фреймові моделі* – представляють знання у вигляді структурованих блоків-фреймів, кожен з яких у своїх слотах містить мінімальний опис конкретного об'єкта (сутності, поняття) Про;
- *семантичні мережі* – відображають знання у вигляді орієнтованих графів, де вершини – це поняття, а дуги – це взаємозв'язки (відношення) між поняттями.

Кожна з цих моделей має свої переваги, однак у сучасних розробках інтелектуальних ГІС все більше уваги приділяється онтологічним моделям представлення знань. *Онтології* дозволяють більш формально і точно описувати предметну область, зберігаючи при цьому семантику понять. Їх розвиток значною мірою зумовлений поширенням веб-технологій, де моделі онтологій використовуються для покращення пошуку та аналізу інформації у веб-середовищі. На відміну від традиційних методів, онтологічний підхід забезпечує формальне визначення знань у форматах RDF (*Resource Description Framework*) або OWL (*Web Ontology Language*), які реалізують комп'ютерну підтримку семантики концептів, включених у модель знань геоінформаційної системи.

Аналіз останніх досліджень і публікацій свідчить про тенденцію інтеграції ГІС цифрового землеробства з інтелектуальними технологіями, яка зосереджується на таких ключових аспектах:

- використання моделей машинного навчання та алгоритмів штучного інтелекту для аналізу великих обсягів даних з метою автоматизації процесів прийняття рішень для прогнозування врожайності, виявлення аномалій у розвитку рослин та ін. [1–4];
- розробка інструментів та платформ на основі онтологій для інтеграції та аналізу аграрних даних, що надають користувачам рекомендації на основі семантичного розуміння даних [5–8];
- застосування онтологій для моделювання агротехнологічних процесів та симуляції різних сценаріїв у сільському господарстві, що допомагає фермерам і дослідникам прогнозувати результати різних практик та приймати обґрунтовані рішення щодо планування посівів, керування агротехнікою на полі у реальному часі, оптимізації використання агресурсів [9–12];
- впровадження онтологій в архітектуру сучасних ГІС для стандартизованого представлення, структурування різномірних даних, забезпечення семантичної інтероперабельності та обміну даними між різними базами даних і користувачами, що дає змогу різним системам «розуміти» та інтерпретувати дані одна одної і, як наслідок, підвищує точність аналізу вхідних даних [13–16].

Виділення невирішених частин загальної проблеми. Незважаючи на прогрес у симбіотичному поєднанні ГІС та інтелектуальних технологій у цифровому землеробстві, залишається низка відкритих питань, які потребують першочергового розв'язання:

- *інтеграція різномірних даних* – сучасні ГІС цифрового землеробства працюють з багатьма джерелами даних, але бракує знанневої формалізованої моделі, яка б уніфікувала інтерпретацію та використання різномірних даних; відсутність стандартизованих онтологічних рішень ускладнює обмін інформацією між різними системами моніторингу, з яких надходять запитовані дані;
- *автоматизація процесів прийняття рішень* – більшість існуючих підходів передбачають лише аналіз зібраних даних без механізмів логічного міркування, виведення та генерації рекомендацій, тому розробка онтологічної моделі дозволить інтелектуальним ГІС не лише декларувати знання, а й ефективно використовувати їх для автоматичного формування релевантних висновків;
- *розвиток методів логічного виведення та семантичного аналізу* – для підвищення ефективності аналізу інтегрованих даних необхідно вдосконалити методи семантичного узгодження та логічного виведення у межах створених онтологічних моделей баз знань.

Мета роботи – розробка онтологічної моделі бази знань для інтелектуальної геоінформаційної системи цифрового землеробства, що забезпечить формалізоване представлення, інтеграцію та обробку знань заданої предметної області у форматі OWL та сприятиме автоматизації аналізу агротехнічних процесів, підвищенню релевантності результатів запитів та оптимізації прийняття рішень на основі врахування семантики інтероперабельних даних.

Чому для інтелектуальної ГІС потрібні саме знання, а не лише дані?

Дані – ключовий ресурс і засіб підтримки ухвалення рішень. Однак цінність даних як джерела для прийняття рішень реалізується лише за умови належної обробки, структурування та інтерпретації, що дозволяє здійснювати логічні висновки на їхній основі. Для цього необхідні відповідні методи та засоби аналізу й обробки даних з урахуванням закладеної в них семантики.

Перед розглядом онтологічних підходів до роботи з даними необхідно визначити співвідношення між поняттями «дані», «інформація» та «знання» (розуміння), якими оперують будь-які інтелектуальні системи незалежно від предметної області, рис. 1. У науковій літературі [1, 2, 5, 7, 13, 16] ці поняття інколи розрізняють, а в деяких випадках розглядають як тотожні.

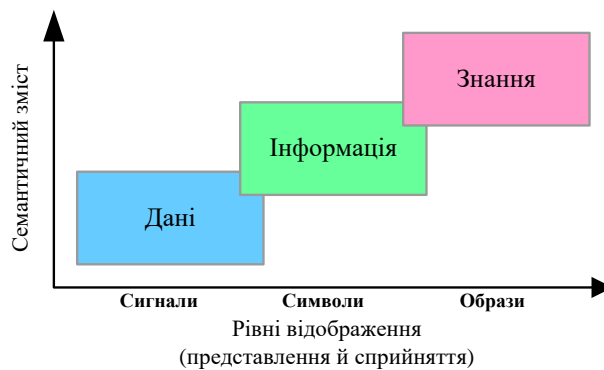


РИС. 1. Система координат, що описує співвідношення понять: дані, інформація, знання

Дані – це факти, поняття або команди, подані у формалізованому вигляді, що забезпечує їх передавання, інтерпретацію та обробку як вручну, так і за допомогою засобів автоматизації. Вони можуть бути представлені у вигляді наборів символів (текстових рядків), числових значень або зображень, проте самі по собі не мають прив'язки до контексту.

У процесі обробки, незалежно від того, здійснюється вона людиною чи комп'ютерною системою, дані набувають структурованого вигляду та перетворюються на інформацію. Інформація дає змогу отримати відповіді на запитання «хто?», «що?», «де?» і «коли?». Головна відмінність між даними та інформацією полягає у наявності контексту, який визначається відповідним питанням. Таким чином, **інформація** – це дані, зміст яких інтерпретовано як значення у визначеному контексті або вони оброблені чи подані у формі, яка має сенс для користувача.

У свою чергу, **знання** – це сукупність фактів, закономірностей та евристичних правил, що використовуються для розв'язання поставлених завдань. Знання можна визначити як дані та інформацію, що набувають практичного застосування. Якщо інформація надає відповіді на запитання вищенаведеного типу, то знання відповідає на запитання «як?».

Знання виступає як засіб інтеграції окремих фрагментів інформації в єдину узгоджену систему, що забезпечує високий рівень достовірності та логічної узгодженості отриманих висновків.

Отже, **вхідні (початкові, необроблені) дані не дають відповідей на запитання «що робити?»**. Наприклад, сенсор показує низький рівень вологи у ґрунті. Але як зрозуміти, чи потрібно поливати рослини, скільки води потрібно і коли? Тут необхідні знання.

Знання дозволяють автоматизувати процеси. На основі знань система може самостійно генерувати рекомендації щодо поливу, удобрення чи прогнозування врожайності.

Інтеграція різнорідних даних. Дані з різних джерел (IoT-сенсори, супутники, дрони) часто є неструктурованими. Онтологічна база знань допомагає їх об'єднати в єдину логічну модель.

Прогнозування та аналіз ризиків. На основі знань можна прогнозувати розвиток хвороб рослин, кліматичні зміни та їхній вплив на врожай.

У табл. 1 наведено порівняльну характеристику даних і знань, які використовуються інтелектуальною ГІС цифрового землеробства.

ТАБЛИЦЯ 1. Основні відмінності між даними та знаннями в інтелектуальній ГІС цифрового землеробства

Характеристика	Дані	Знання
Визначення	Необроблені, неінтерпретовані факти або вимірювання, отримані з різних джерел	Осмислена, структурована інформація, що використовується системою та користувачами для ухвалення рішень
Форма представлення	Числові значення, текстові записи, координати, зображення тощо	Онтології, правила, причинно-наслідкові зв'язки, аналітичні моделі
Приклад у цифровому землеробстві	Температура ґрунту 18°C, вологість 40%, вміст азоту 15 мг/кг	Правило-аксіома: «При вологості ґрунту < 30% і високій температурі повітря рекомендується полив»
Рівень складності	Простий, базовий рівень, притаманний конкретним екземплярам даних	Вищий рівень абстракції, що використовує дані для прийняття рішень
Джерело	Сенсори IoT, супутникові знімки, метео-вебсервіси, ортофотоплани з дронів, GPS-трекери	Експертні знання, алгоритми аналізу, машинне навчання, інтегровані онтологічні моделі
Роль у ГІС	Вхідні параметри, що потребують обробки	Інструмент для інтерпретації даних і генерування рекомендацій

Резюмуючи, зауважимо: дані – це окремі факти без контексту, тоді як знання структурують ці факти, надаючи змогу в автоматизованому режимі приймати оптимальні агрономічні рішення.

Інтелектуальна ГІС цифрового землеробства потребує не лише безперервного збору даних, а й їхньої інтерпретації через знання, представлені у спроектованій онтології, що забезпечує автоматизацію та підвищує точність керування агропроцесами.

Аспекти онтології: семантика і прагматика.

Відомо, що незалежно від ПрО схема формальної моделі повної онтології подається кортежем:

$$O = \langle C, R, F, A(D, R_s) \rangle,$$

де C – множина концептів; R – множина відношень між ними; $F : C \times R$ – множина функцій інтерпретації, визначених на елементах попередніх множин; A – множина аксіом, за допомогою яких записуються завжди істинні висловлювання (означення і обмеження); D – множина додаткових означень концептів; R_s – множина обмежень, які задають область дії конкретних концептів.

Концептуалізація заданої ПрО формує основу для моделювання відповідної системи знань та визначає протоколи взаємодії між програмними модулями, що використовують ці знання. Точна специфікація процесу концептуалізації утворює онтологію, яка представляється однією з формальних мов (у дослідженні для специфікації онтології використано мову OWL).

Семантичний і прагматичний аспекти онтології можна розглядати як інтелект-карту, що визначає її виміри, рис. 2.

Семантичний аспект стосується структурування та формалізації знань у межах онтології. Це означає, що онтологія, з одного боку, формалізує контент – визначає, які об'єкти (сутності, концепти)

пти) існують у предметній області, та виражає їхній зміст (семантику) за допомогою формальних аксіом та обмежень, а з іншого – структурує знання, встановлюючи між сутностями значущі відношення (зв'язки), та забезпечує необхідну деталізацію – можливість глибшого розгляду знань через встановлені правила та обмеження.



РИС. 2. Карта вимірів онтології

Наприклад, у ГІС цифрового землеробства онтологія може містити такі *категорії* (сутності): «Ґрунт», «Культура», «Метеоумови», «Технологія обробки». *Відношення* між ними: «Тип ґрунту впливає на врожайність культури», «Метеоумови визначають режим зрошення». *Обмеження*: «Ґрунт не може мати одночасно високу кислотність та високу врожайність».

Перше із зазначених відношень відповідає такому фрагменту онтології у форматі OWL:

```
<owl:Class rdf:ID="SoilType"/>
<owl:Class rdf:ID="Crop"/>
<owl:ObjectProperty rdf:ID="affectsYield">
  <rdfs:domain rdf:resource="#SoilType"/>
  <rdfs:range rdf:resource="#Crop"/>
</owl:ObjectProperty>
```

Більш детально про основні концепти та інші складові онтології – в наступному підрозділі.

Тобто, семантичний аспект дозволяє онтології не просто зберігати концепти, а чітко визначати їхній взаємозв'язок у заданому домені.

Прагматичний аспект фокусується на прикладному використанні онтології та включає: методи проектування (створення онтології потребує чітких правил, строгості та перевірки (валідації) її на несуперечність); передбачуване та повторне використання (онтологія не просто модель, а інструмент, який допомагає керувати знаннями, приймати рішення та задавати контекст для механізму міркувань та «розумного» виведення (*reasoning*) нових знань); контекст застосування (онтологія має бути адаптована для конкретних сценаріїв у заданому домені).

Домен можна розділити на три рівні: домен знань – теоретичний рівень (визначає, які кванти знань – концепти та зв'язки існують в Про ГІС цифрового землеробства), домен додатків – як ці знання використовуються в конкретних системах (зокрема, інтелектуальний ГІС цифрового землеробства), функціональний домен – які завдання розв'язуються (прогнозування врожайності, оптимізація внесення добрив, раціональне зрошення посівів тощо).

Якщо семантичний рівень онтології визначає, які фактори впливають на врожайність (грунт, клімат, технології), то прагматичний рівень застосовує ці знання для автоматизованого ухвалення рішень (визначення оптимальних параметрів внесення добрив на основі онтологічних правил).

У такий спосіб онтологія не лише описує об'єкти та процеси, характерні для заданої Про, а й допомагає автоматизувати аналіз даних, підтримує процеси прогнозування та ухвалення рішень.

Формалізація моделі онтологічної бази знань.

Онтологічну модель бази знань інтелектуальної ГІС цифрового землеробства побудовано на основі мови веб-онтологій OWL у середовищі Protege, яке дозволяє чітко визначити: концепти-класи як кванти знань Про, об'єкти як екземпляри класів (конкретні індивіди з ініціалізованими атрибутами), їхні властивості та взаємозв'язки.

Схему такої бази знань *KB* можна подати у вигляді:

$$KB = (O, I),$$

де *O* – онтологія, *I* – індивіди (дані).

Тут онтологію *O* формально задано як упорядковану четвірку:

$$O = (C, R, D, A),$$

в якій *C* – класи, *R* – об'єктні властивості, *D* – атрибутивні властивості (властивості даних), *A* – аксіоми й обмеження.

Приклади виокремлених класів та підкласів розробленої онтології, декомпованих за декількома рівнями ієрархії, показано на рис. 3 і 4. Суть організації квантів знань різного роду та характеру зводиться до чіткого структурування даних за категоріями.

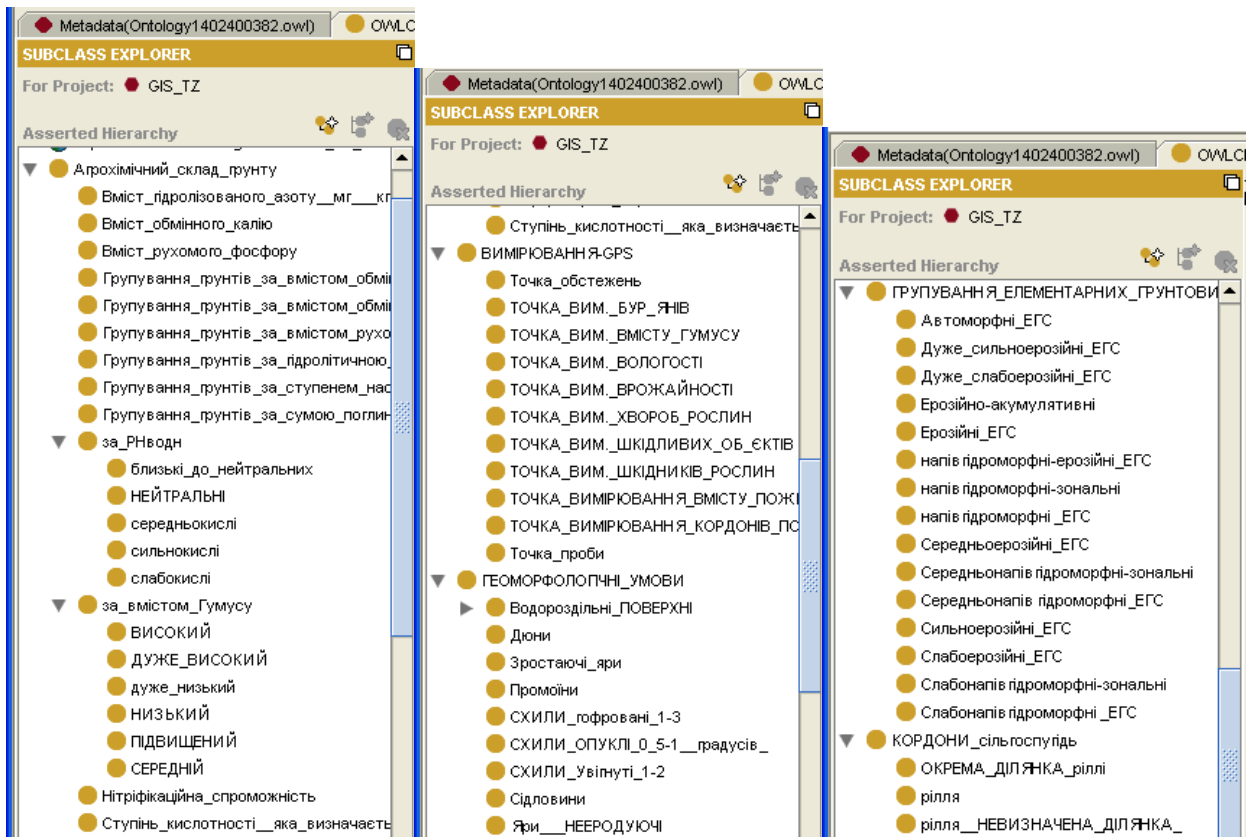


РИС. 3. Таксономія класів онтологічної бази знань, спроектованої в середовищі Protege (перший набір сутностей)

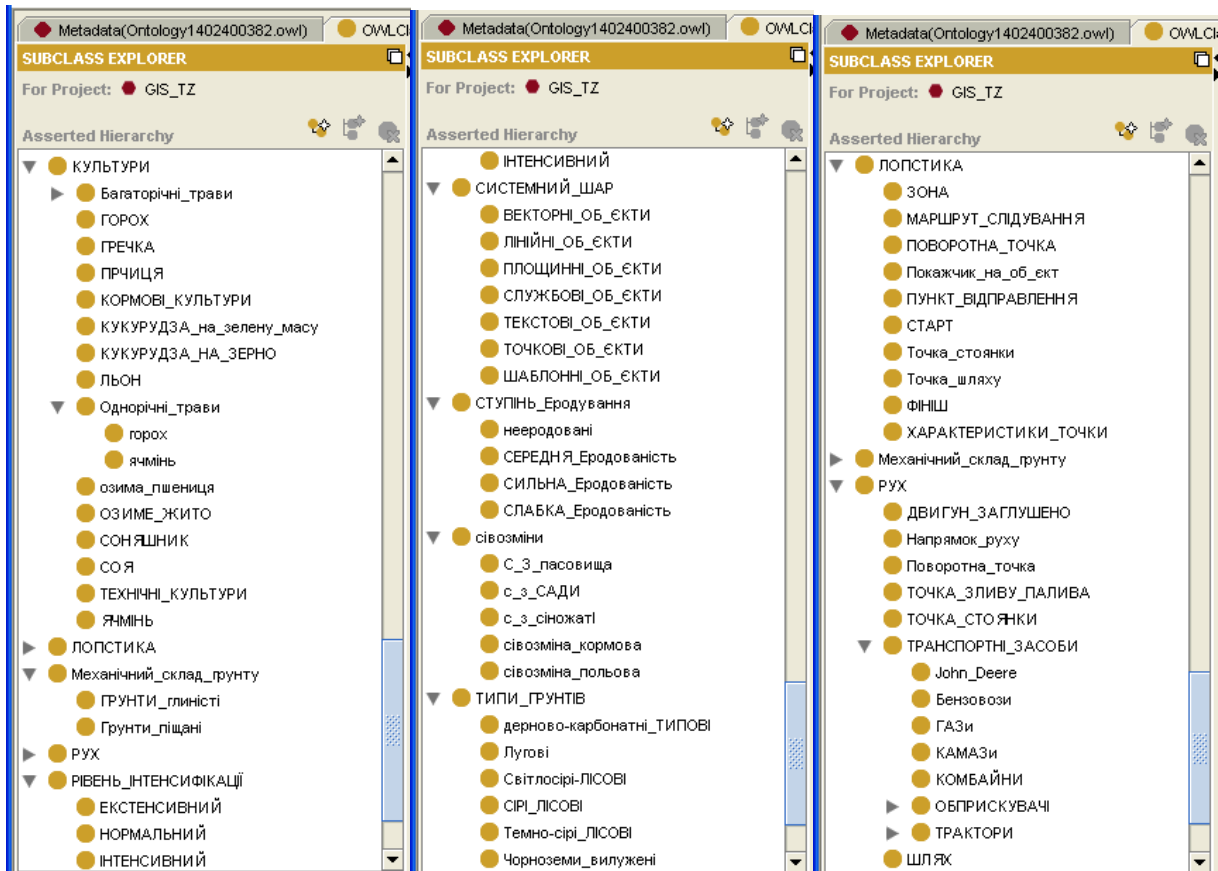


РИС. 4. Ієрархічна структура онтології інтелектуальної ГІС цифрового землеробства (другий набір сутностей)

В межах онтології об'єкти реального світу групуються згідно логіки, і далі, в свою чергу, поділяються всередині груп (класів) за більш чіткими і конкретними ознаками.

Серед основних категорій, що формують розроблену онтологію, зазначимо наступні концепти з базовими властивостями: «Ґрунти» (тип ґрунту, родючість, вологість, кислотність); «Культури» (вид, фаза розвитку, потреби у волозі та поживних речовинах); «Агрометеорологічні дані» (опаді, температура, вологість повітря); «Технічні засоби» (трактори, дрони, датчики моніторингу); «Агротехнічні операції» (обробіток ґрунту, посів, зрошення, збирання врожаю).

Далі формально деталізуємо кожну складову онтології.

1. Основні концепти (класи).

Множина класів C визначає основні сутності онтології:

$$C = (Soil, Crop, AgroOperation, Equipment, Sensor, Field, WeatherCondition),$$

де $Soil$ – клас ґрунтів, $Crop$ – клас культур, $AgroOperation$ – клас агрооперацій, $Equipment$ – клас сільськогосподарської техніки, $Sensor$ – клас сенсорів, $Field$ – клас полів, $WeatherCondition$ – клас метеумов.

2. Властивості об'єктів (Object Properties).

Множина R описує відношення між класами об'єктів:

$$R = (hasSoilType, suitableFor, performsOperation, monitors, affects),$$

де $hasSoilType \subseteq Field \times Soil$ (поле має певний тип ґрунту), $suitableFor \subseteq Soil \times Crop$ (ґрунт придатний для певної культури), $performsOperation \subseteq Equipment \times AgroOperation$ (техніка виконує задану агрооперацію), $monitors \subseteq Sensor \times Field$ (сенсор спостерігає поле), $affects \subseteq WeatherCondition \times AgroOperation$ (погодні умови впливають на агрооперації).

3. Властивості даних (Data Properties).

Множина D описує атрибути об'єктів:

$$D = (pHLevel, moisture, temperature, capacity),$$

де $pHLevel \subseteq Soil \times float$ (рівень рН ґрунту), $moisture \subseteq Soil \times float$ (вологість ґрунту), $temperature \subseteq WeatherCondition \times float$ (температура повітря), $capacity \subseteq Equipment \times int$ (продуктивність техніки).

4. Аксиоми та обмеження (Axioms & Constraints).

У табл. 2 наведемо різні варіанти представлення обмежень, які структурно належать до блоку аксіоматизації для концептів і відношень розробленої онтології.

ТАБЛИЦЯ 2. Формалізація обмежень онтології

Формальне представлення обмеження	Інтерпретація обмеження
$\forall x \in Soil, \exists y \in float (pHLevel(x, y) \wedge moisture(x, y))$	Ґрунт має один рН-рівень та рівень вологості
$\forall x \in Field, \exists y \in Soil (hasSoilType(x, y))$	Кожне сільськогосподарське поле має щонайменше один тип ґрунту
$\forall x \in Equipment, \exists y \in AgroOperation (performsOperation(x, y))$	Техніка виконує щонайменше одну операцію
$\forall x \in Sensor, \exists y \in \{moisture, temperature\} (monitors(x, y))$	Сенсори можуть вимірювати тільки певні параметри

За допомогою множини аксіом, декомповованої на дві частини – множину додаткових означень концептів і множину обмежень, здійснюється автоматизація обробки даних із сенсорів, яка сприяє машинній інтерпретації (семантичному аналізу, розпізнаванню, інтеграції) інформації для подальшого автоматизованого прийняття рішень на її основі (розподіл ресурсів, вибір оптимальних процесів) щодо розв'язання поставлених прикладних задач.

5. Правила виведення (Inference Rules).

За допомогою алгоритму логічного виведення онтологія дозволяє отримати нові знання. Так, якщо поле має ґрунт певного типу, а цей тип ґрунту підходить для культури, то культура може рости на цьому полі:

$$(hasSoilType(F, S)) \wedge suitableFor(S, C) \Rightarrow growsOn(C, F).$$

Далі наведемо приклад фрагменту формальної онтології OWL (в синтаксисі Turtle), яка базується на вищевизначених класах, властивостях об'єктів і даних:

```
@prefix : <http://example.com/agriculture#>.
@prefix owl: <http://www.w3.org/2002/07/owl#>.
@prefix xsd: <http://www.w3.org/2001/XMLSchema#>.

:Soil a owl:Class.
:Crop a owl:Class.
:Field a owl:Class.
:AgroOperation a owl:Class.
:Sensor a owl:Class.
```

```

:hasSoilType a owl:ObjectProperty;
  rdfs:domain :Field;
  rdfs:range :Soil.
:suitableFor a owl:ObjectProperty;
  rdfs:domain :Soil;
  rdfs:range :Crop.
:pHLevel a owl:DatatypeProperty;
  rdfs:domain :Soil;
  rdfs:range xsd:float.
    
```

Така формальна модель онтології дозволяє структуровано представити ключові семантичні компоненти, кванти знань інтелектуальної ГІС цифрового землеробства, їхні взаємозв'язки та атрибути, значущі для заданих прикладних задач. Використання у цій системі засобів OWL, RDF, RDFS (RDF Schema) та логічних правил виведення допомагає забезпечити інтеграцію різнорідних даних, аналіз різних сценаріїв і ситуацій та підтримку прийняття релевантних рішень.

Формування запитів до онтологічної бази знань.

Запити до сформованої онтологічної бази знань формуються на основі мови SPARQL (*SPARQL Protocol and RDF Query Language*), яка працює з онтологією через RDF.

Стандартний SPARQL-запит має вигляд:

$$SELECT \text{ ?variable } WHERE \{ patterns \}.$$

Формально запит до онтології складається з трьох основних компонентів:

$$Q = (M, C_{query}, R_{query}).$$

Мета запиту M – описує, яку інформацію необхідно отримати (класи, властивості, значення).

Умови C_{query} – задають шаблони, які мають відповідати триплетам RDF: (*subject, predicate, object*), рис. 5.

Результат R_{query} – множина індивідів або значень, які задовольняють вказані у запиті умови.



РИС. 5. Схема триплету RDF, який задає відношення між концептами онтології

Набір відношень між поняттями онтології відображається на множині трійок, кортеж яких будується з трьох частин: Суб'єкта (підмета), Предиката (присудка) і Об'єкта, які беруть участь у запиті. Залежно від контексту одна й та сама сутність онтології може виступати в будь-якій ролі.

Концептуально RDF забезпечує мінімальний рівень представлення знань у середовищі інтелектуальної ГІС цифрового землеробства. Специфікація RDF спирається на стандарти, що лежать в основі вебмереж, а саме:

- Unicode (служує для представлення символів алфавітів різних мов при зазначенні імені ресурсу (сутності), представленого в онтології);
- URI (використовується для визначення унікальних ідентифікаторів ресурсів у заданому просторі імен для конкретної специфікації);
- XML і XML Schema (для структурування та обміну інформацією і зберігання RDF-трійок у XML-синтаксисі).

Робота алгоритму формування запиту розпочинається з аналізу потреб користувача, тобто визначення того, що саме шукається в онтології. Наприклад: «Знайти всі поля з рівнем рН > 6», «Яка техніка доступна для поливу?» або «Які поля придатні для кукурудзи?». Потреби підлягають перетворенню у семантичну форму, тобто у терміни класів і властивостей онтології. Для цього шаблон запиту задається як множина триплетів:

$$T = (s, p, o),$$

де s – суб'єкт (клас або індивід), p – властивість, o – об'єкт або значення.

Процедура виконання запиту до онтологічної бази знань використовує інтерпретатор запитів SPARQL, який здійснює обробку результату, форматування і виведення даних.

Формальні запити, що відображують зазначені потреби користувача, у синтаксисі SPARQL, приймають вигляд:

Запит 1: Знайти всі поля, де рівень рН > 6.

```
PREFIX : <http://example.com/agriculture#>
SELECT ?field
WHERE {
  ?field rdf:type :Field.
  ?field :hasSoilType ?soil.
  ?soil :pHLevel ?pH.
  FILTER(?pH > 6)
}
```

Запит 2: Знайти техніку, яка може виконувати агрооперацію «Посів».

```
PREFIX : <http://example.com/agriculture#>
SELECT ?equipment
WHERE {
  ?equipment rdf:type :Equipment.
  ?equipment :performsOperation :Sowing.
}
```

Запит 3: Знайти поля, де тип ґрунту підходить для вирощування кукурудзи.

```
PREFIX : <http://example.com/agriculture#>
SELECT ?field
WHERE {
  ?field :hasSoilType ?soil.
  ?soil :suitableFor :Corn.
}
```

Отже, SPARQL дозволяє здійснювати семантичний пошук і аналіз знань, використовуючи триплетну модель RDF.

Висновки. Онтологічне моделювання є дієвим підходом для побудови інтелектуальних геоінформаційних систем у цифровому землеробстві. Розроблена онтологічна модель бази знань забезпечує ефективну інтеграцію різномірних даних, автоматизацію прийняття рішень та, як наслідок, підвищення ефективності аграрного виробництва. Використання формальних методів опису знань та логічного виведення дозволяє створити гнучку та адаптивну систему, здатну до самонавчання та вдосконалення за рахунок розширення онтологічної моделі шляхом інтеграції нових концептів і зв'язків між ними. Тому подальші дослідження можуть бути спрямовані, з одного боку, на розширення моделі через включення більш детальних концептів для розв'язання більш широкого спектру прикладних задач, а з другого – на реалізацію механізмів логічного виведення із застосуванням правил SWRL для підвищення рівня автоматизації процесів прийняття рішень.

Фінансування. Це дослідження виконано за підтримки НАН України (проект 0124U002317).

Авторські внески: Касім А.М. – узагальнення, концептуалізація, методологія, формальний аналіз, написання – оригінальна чернетка. Касім М.М. – дослідження, ресурси, редагування, програмне забезпечення, візуалізація.

Список літератури

1. Касім А.М. Архітектура онтологічного програмного модуля для знання-орієнтованої геоінформаційної системи smart землеробства. *Комп'ютерні засоби, мережі та системи*. 2016. **15**. С. 162–166. http://nbuv.gov.ua/UJRN/Kzms_2016_15_23
2. Іванченко Г.Ф. Системи штучного інтелекту. К.: КНЕУ, 2011. 382 с.
3. Касім А.М., Касім М.М. Компоненти онтологічної бази знань для інтелектуальної геоінформаційної системи підтримки прийняття рішень в сфері управління агротехнологічними операціями. *Сучасна інформатика: проблеми, досягнення та перспективи розвитку*: тези доповідей Міжнародної наукової конференції, присвяченої 60-річчю заснування Інституту кібернетики імені В.М. Глушкова НАН України (Київ, 13-15 грудня 2017). К.: Інститут кібернетики імені В.М. Глушкова НАН України, 2017. С. 207–209.
4. Goldstein A., Fink L., Ravid G. A Framework for Evaluating Agricultural Ontologies. *Sustainability*. 2021. **13** (11): 6387. <https://doi.org/10.3390/su13116387>
5. Палагін О.В., Петренко М.Г. Про деякі особливості побудови онтологічних моделей предметних областей. *Control systems & computers*. 2019. **3**. С. 23–37. http://nbuv.gov.ua/UJRN/USM_2019_3_5
6. Васюхін М.І., Касім М.М., Шелестовський В.Г., Касім А.М., Долинний В.В., Горбатюк С.В. Геоінформаційна система для малих і середніх фермерських господарств. *Безпека життєдіяльності на транспорті і виробництві – освіта, наука, практика (SLA-2017)*: збірка матеріалів IV Міжнародної науково-практичної конференції (м. Херсон, 14-16 вересня 2017 року). Херсон: Херсонська державна морська академія, 2017. С. 324–330.
7. Гаврилова Т.А., Хорошевський В.Ф. Базы знаний интеллектуальных систем. СПб.: Питер, 2001. 384 с.
8. Васюхін М.І., Касім А.М., Ткаченко А.Н., Касім М.М. Повышение продовольственной и экологической безопасности страны путем применения прогрессивных информационных технологий в сфере прецизионного земледелия. *Automated Control Systems*. 2018. **2** (26). P. 120–127. https://gtu.ge/Journals/mas/Referat/N26_conf_unesco_2018_2_26.pdf
9. Кохан С.С., Москаленко А.А. Розробка структури бази знань системи геоінформаційного моніторингу для оцінки якісного стану земель сільськогосподарського призначення. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2015. **5** (2(77)). С. 32–37. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2015.51050>
10. Касім А.М. Розробка онтологічних описів картографічних прошарків для геоінформаційної системи прецизійного землеробства. *Проблеми та перспективи розвитку енергетики, електротехнологій та автоматики в АПК*: тези доповідей IV Міжнародної науково-практичної конференції (21-22 листопада 2016 р., Київ, Україна). К.: НУБіП України, 2016. С. 161–162.
11. Ngo Q.H., Le-Khac N.A., Kechadi T. Ontology Based Approach for Precision Agriculture. In: Kaenamponpan M., Malaka R., Nguyen D., Schwind N. (eds). *Multi-disciplinary Trends in Artificial Intelligence. MIWAI 2018. Lecture Notes in Computer Science*. 2018. **11248**. Springer, Cham. P. 120–127. https://doi.org/10.1007/978-3-030-03014-8_15
12. Касім А.М., Касім М.М. Розподілена структура геоінформаційної системи для реалізації точного smart-землеробства у фермерських господарствах України. *Цифрова революція в соціально-економічній сфері: історія і перспективи*: матеріали VI Всеукраїнської науково-практичної конференції «Глушковські читання» (Київ, 13 грудня 2017). Київ: ВПК «Політехніка», 2017. С. 82–85. https://ogas.glushkov.su/sites/default/files/docs/2018/05/27/pdf/sbornik_gch_2017.pdf#page=82
13. Бабенко Є. Методологічні основи проектування інформаційних систем у рослинництві. *Кібернетика та комп'ютерні технології*. 2022. **2**. С. 95–105. <https://doi.org/10.34229/2707-451X.22.2.10>
14. Gelian S., Maohua W., Xiao Y., Rui Y., Binyun Z. Study on precision agriculture knowledge presentation with ontology. *AASRI Conference on Modeling, Identification and Control*. 2012. **3**. Elsevier B.V. P. 732–738. <https://doi.org/10.1016/j.aasri.2012.11.116>
15. Butora A., Soloniewicz B., Schwartz C., Aziz C., Su S., M. Mahmoud. The Practical use of GIS in Agriculture. *International Conference on Computational Science and Computational Intelligence (CSCI)*, Las Vegas, NV, USA, 2022. P. 1525–1529. <https://doi.org/10.1109/CSCI58124.2022.00270>
16. Олещенко А., Пашинська Н., Козлов М. та ін. Управління розвитком громади на основі аналізу даних: практичний посібник. Київ, 2019. 164 с.

Одержано 06.05.2025

Касім Аніса Мохаммадівна,

кандидат технічних наук, старший науковий співробітник відділу мікропроцесорної техніки Інституту кібернетики імені В.М. Глушкова НАН України, Київ,

<https://orcid.org/0000-0003-3627-3855>

aneesa.qasem@gmail.com

Касім Масуд Мохаммадович,

аспірант Національного університету біоресурсів і природокористування України, Київ.

masud@i.ua

UDC 004.9

Anisa Kasim¹, Masud Kasim^{2*}

Ontological Modeling of the Knowledge Base of Intellectual GIS of Digital Agriculture

¹ V.M. Glushkov Institute of Cybernetics of the NAS of Ukraine, Kyiv

² National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine, Kyiv

* Correspondence: aneesa.qasem@gmail.com

Introduction. The field of digital agriculture requires effective management of agricultural resources based on intelligent analysis of heterogeneous spatiotemporal data collected from various sensor sources. Modern geographic information systems (GIS) allow collecting, processing and visualizing this data, but their capabilities for semantic information coordination and automated decision-making remain limited. The ontological approach provides systematization, structuring and interoperability of sensor data, formalization of domain knowledge, as well as intelligent extension of GIS functionality for solving applied tasks.

The purpose of the paper. The research is aimed at developing an ontological model of the knowledge base of intelligent GIS of digital agriculture, which will provide a formalized representation, integration and processing of knowledge of a given subject area in the OWL format and will contribute to the automation of the analysis of agrotechnical processes, increasing the relevance of query results and optimizing decision-making based on taking into account the semantics of interoperable data.

Results. The need for knowledge processing is substantiated to extract context, interpret and integrate heterogeneous data coming from different sources (agrodrones, autonomous tractors, cartographic services, etc.) and having different structures and levels of detail.

The semantic and pragmatic aspects of the ontology are determined in the form of a mind map, which reflects the dimensions of the ontology in terms of formalization and detailing of information content and reuse of the ontology to solve new applied problems and extend the knowledge network.

A formal ontological model of a knowledge base is proposed, which covers the key entities (categories) of digital agriculture (soils, crops, climatic factors, technical means and agro-technological operations) in two components – the four-component ontology containing interconnected sets: concepts (classes and subclasses), relations, interpretation functions, axioms, and a separate set of instances of defined concepts, which plays the role of a database with which the previous sets are linked.

The proposed model was validated on test data in the Protege environment, which supports the representation of knowledge in OWL notation.

A number of queries were generated for the constructed ontological knowledge base based on the SPARQL language.

Conclusions. The developed ontological model of the knowledge base for the intelligent geoinformation system of digital agriculture provides semantic integration and interpretation of heterogeneous data, automation of decision-making and, as a result, increasing the efficiency of agricultural production, and also allows to create a flexible and adaptive system capable of evolution by extending the created model by integrating new concepts and relations between them. Further research on this topic involves the implementation of logical inference mechanisms within the model using SWRL rules to increase the level of automation of decision-making processes.

Keywords: ontology, geographic information system, digital agriculture, Protege, OWL, RDF, SPARQL, knowledge base, semantics.