



## Автоматизация управления беспилотными транспортными средствами в точном земледелии

© 2026, А.А. Романов, А.А. Филиппов ✉

Ульяновский государственный технический университет (УлГТУ), Ульяновск, Россия

### Аннотация

Рассматривается задача автоматизации управления беспилотными транспортными средствами в точном земледелии. На основе онтологии предметной области предложен комплексный подход к формированию заданий, включающих траекторию движения и управляющие сигналы для средств обработки сельскохозяйственных полей. Разработан программный комплекс, включающий географическую информационную систему для создания электронных карт полей, алгоритм формирования заданий и модуль нечёткого логического вывода на основе онтологий и производственных правил. Особенностью подхода является формализация экспертных знаний агрономов, позволяющая учитывать почвенно-климатические особенности, характеристики культур и параметры технологических операций. Представлены структура онтологии для описания технологических операций обработки полей и механизм нечёткого вывода для расчёта норм внесения удобрений, позволяющий учитывать особенности конкретного участка поля, сельскохозяйственной культуры и выполняемой технологической операции. Создано расширение для конфигурации «1С:ERP Агро-промышленный комплекс», объединяющее разработанный программный комплекс с учётной системой сельскохозяйственного предприятия. Описан пример применения системы для расчёта нормы внесения удобрений под зерновые культуры, который показал, что суммарный расход удобрений на 7% ниже при использовании предложенного подхода по сравнению с традиционным методом.

**Ключевые слова:** беспилотное транспортное средство, онтология, нечёткий логический вывод, автоматизация управления, технологическая операция, точное земледелие.

**Цитирование:** Романов А.А., Филиппов А.А. Автоматизация управления беспилотными транспортными средствами в точном земледелии. *Онтология проектирования*. 2026. Т.16, №2(60). С.255-268. DOI: 10.18287/2223-9537-2026-16-2-255-268.

**Благодарности:** авторы выражают признательность руководству ГК «АгроСервис-ИТ».

**Финансирование:** исследование выполнено за счёт гранта Российского научного фонда (проект № 23-11-00265).

**Вклад авторов:** Филиппов А.А. – постановка задачи, концептуализация, формализация модели; Романов А.А. – экспертиза материалов, разработка программной системы, проверка результатов.

**Конфликт интересов:** авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

### Введение

Сельское хозяйство находится на этапе автоматизация бизнес-процессов [1]. Это особенно актуально для растениеводства, где своевременность и точность выполнения технологических операций влияют на конечный результат. Применение беспилотных транспортных средств (БПТС) позволяет уменьшить воздействие вредных факторов на оператора и способствует переходу к точному земледелию с учётом неоднородности поля и оптимальному управлению ресурсами. В данной работе под оптимальным понимается такое управление БПТС, которое минимизирует затраты (расход материалов и длину маршрута). Критерием оптимальности является достижение целевой нормы внесения материалов (удобрения, пестициды и т.д.), определяемой с использованием базы знаний (БЗ) и механизма нечёткого

логического вывода (НЛВ). Ограничениями являются геометрические параметры поля (границы, препятствия), технические характеристики БПТС (ширина обработки) и агротехнологические требования, формализованные в виде нечётких правил. Каждое поле характеризуется: рельефом, границами, почвенным составом, историей обработок и др.; различные сельскохозяйственные культуры требуют особых подходов; технологические операции имеют сложные взаимосвязи и ограничения, известные лишь специалистам. Создание интеллектуальных управляющих систем, формализующих опыт агрономов-технологов, позволит преобразовать качественные оценки специалистов в количественные задания для системы управления БПТС и осуществить более точное контекстно-ориентированное управление производственными процессами.

## 1 Постановка задачи

Внедрение технологий точного земледелия связано с использованием широкого спектра технических и программных решений. Известны комплексные проприетарные платформы от производителей техники (например, *John Deere Operations Center*<sup>1</sup>, *CLAAS Telematics*<sup>2</sup>), отдельные агронавигаторы<sup>3</sup> и системы параллельного вождения<sup>4</sup>. Данные системы обладают высокой точностью позиционирования, отработанными алгоритмами планирования пути, удобными картографическими интерфейсами и имеют определённые ограничения [2].

- Эффективное функционирование таких систем часто возможно только при использовании специализированной техники конкретного производителя, оснащённой штатными системами управления и дорогостоящими датчиками. Это создаёт высокий порог входа и приводит к зависимости от поставщика.
- Проприетарные программные платформы, как правило, представляют собой «чёрный ящик» с ограниченными возможностями адаптации и интеграции. Пользователь не может модифицировать логику принятия решений (например, алгоритмы расчёта норм внесения препаратов) под условия конкретного хозяйства, агрономические практики или локальные нормативы.
- Большинство решений направлено на управление техникой в поле, но слабо связано с учётными системами сельхозпредприятия.

Известны работы, посвящённые вопросам использования методов искусственного интеллекта [3-6], онтологий [7, 8] и нечёткой логики [9] для решения различных сельскохозяйственных задач. Однако эти работы часто имеют фрагментарный характер и решают лишь частные задачи. Предлагаемый подход направлен на интеграцию с существующей инфраструктурой сельхозпредприятия. В [10] описана модель БЗ предметной области земледелия: параметры поля, особенности обрабатываемых культур, особенности процесса и средств обработки, параметры БПТС. В данной работе предложенная в [10] модель дополнена использованием НЛВ для расчёта норм внесения удобрений на основе экспертных производственных правил, учитывающих особенности конкретного участка поля, сельскохозяйственной культуры и выполняемой технологической операции.

Целью настоящей работы является повышение эффективности и качества выполнения технологических операций БПТС за счёт разработки метода формирования комплексного задания на управление БПТС. Для достижения поставленной цели задание должно формироваться с учётом комплекса факторов: характеристик поля, агрономических требований культуры, параметров операции и технических возможностей оборудования [11]. В качестве критерия эффективности выполнения задания рассматривается минимизация отклонения расчётной нормы удобрений от экспертных агрономических рекомендаций при соблюдении агротехнологических требований.

<sup>1</sup> <https://www.deere.com/en/technology-products/precision-ag-technology/operations-center/features/>.

<sup>2</sup> <https://www.claas.com/en-be/press/press-releases/2025-09-23-agritechnica-2025>.

<sup>3</sup> <https://www2.agriculture.trimble.com/product/gfx-750-display/>.

<sup>4</sup> <https://thorsenteknik.se/pdfs/brugermanual-Topcon%20X14%20UK.pdf>.

В работе решаются следующие задачи:

- разработка географической информационной системы для формирования электронных карт полей с возможностью создания тематических слоёв, отражающих особенности производственного процесса: характеристики почв, заболевания растений, историю обработок и текущее состояние посевов;
- создание модуля НЛВ на основе БЗ, обеспечивающего формализацию и использование экспертных знаний агрономов при принятии решений и управлении БПТС;
- разработка алгоритма формирования заданий для БПТС, учитывающего особенности поля, требования сельскохозяйственных культур, параметры технологических операций и технические характеристики средств обработки.

Использование онтологического подхода для формализации экспертных знаний в задачах управления технологическими операциями в сельском хозяйстве является активно развивающимся научным направлением [12, 13]. Интеграция онтологий с интернетом вещей [14-16] и системами поддержки принятия решений [17] позволяет создавать гибкие системы управления.

## 2 Алгоритм формирования заданий

Формально задачу формирования заданий для системы управления БПТС можно представить в виде функции:  $\mathbb{F}: F_i \times \hat{S} \times V_j \times A \rightarrow T_{ij}$ , аргументами которой являются сведения об  $i$ -м поле  $F_i$ , технологической операции  $\hat{S}$ ,  $j$ -м БПТС  $V_j$  и формализованные знания агрономов в виде БЗ  $A$  с функцией НЛВ:  $F_i = \langle S_i^F, B_i^F, O_i^F, \hat{A}_i^F, D_i^F \rangle$ ,

где  $S_i^F = \left\{ \langle \hat{S}_{ik}, \hat{I}_{ik}, \{ \langle \hat{V}_{ikl}, \hat{T}_{ikl}, \hat{M}_{ikl} \rangle_{l=1}^L \} \}_{k=1}^K \right\}$  – спецификация технологических операций, которые необходимо выполнить на  $i$ -м поле в текущем сезоне с учётом находящейся на поле сельскохозяйственной культуры  $\hat{I}_{ik}$ . Каждая технологическая операция  $\hat{S}_{ik}$  определяет использование множества БПТС  $\hat{V}_{ikl} \in V$ , средств обработки  $\hat{T}_{ikl} \in T$  и материалов  $\hat{M}_{ikl} \in M$  с учётом их взаимной совместимости;

$B_i^F$  – множество координат границы  $i$ -го поля;

$O_i^F = \{ \langle T_{ik}^O, B_{ik}^O \rangle_{k=1}^K \}$  – множество препятствий на  $i$ -м поле, каждое  $k$ -е препятствие  $O_{ik}^F$  определяется типом  $T_{ik}^O$  и множеством координат  $B_{ik}^O$ ;

$\hat{A}_i^F = \left\{ \langle B_{ik}^{\hat{A}}, \{ \langle key_{ikl}^{\hat{A}}, value_{ikl}^{\hat{A}} \rangle_{l=1}^L \} \}_{k=1}^K \right\}$  – множество отдельных участков  $i$ -го поля,  $k$ -й участок поля имеет границы в виде множества координат  $B_{ik}^{\hat{A}}$ , а также данные агрохимического обследования почвы  $k$ -го участка  $\{ \langle key_{ikl}^{\hat{A}}, value_{ikl}^{\hat{A}} \rangle_{l=1}^L \}$  (ключ-значение);

$D_i^F = \{ \langle B_{ik}^D, N_{ik}^D \rangle_{k=1}^K \}$  – множество заражённых участков  $i$ -го поля,  $k$ -й участок заражения определяется множеством координат границы участка  $B_{ik}^D$  и названием заболевания  $N_{ik}^D$ .

Выбранная для выполнения технологическая операция определяется аргументом  $\hat{S} \in S_i^F$ .

Аргумент  $V_j$  позволяет описать характеристики  $j$ -го БПТС, который выбран для выполнения технологической операции  $\hat{S}$  [10].

БЗ  $A$  содержит формализованные знания агронома в виде нечётких продукционных правил на языке *SWRL*, которые используются для организации НЛВ при формировании задания  $T_{ij}$ .

Результатом вычисления функции  $\mathbb{F}$  является задание  $T_{ij}$  для  $i$ -го поля  $F_i$  и  $j$ -го БПТС  $V_j$  технологической операции  $\hat{S}$  следующего вида:  $T_{ij} = \langle P_{ij}^T, G_{ij}^T, R_{ij}^T \rangle$ ,

где  $P_{ij}^T$  – множество точек маршрута  $j$ -го БПТС  $V_j$  по  $i$ -му полю  $F_i$ , каждая точка представляет собой пару географических координат;

$G_{ij}^T = \left\{ \left\langle B_{ijk}^G, \left\{ \langle key_{ijkl}^G, value_{ijkl}^G \rangle_{l=1}^L \right\}_{k=1}^K \right\rangle \right\}_{k=1}^K$  – множество ячеек, на которые делится поле. Ячейка  $G_{ijk}^T$  имеет координаты границы  $B_{ijk}^G$  с учётом габаритов  $j$ -го БПТС и установленного на БПТС средства обработки, а также содержит множество управляющих сигналов  $\left\{ \langle key_{ijkl}^G, value_{ijkl}^G \rangle_{l=1}^L \right\}$  для установленного средства обработки;

$R_{ij}^T$  – множество отношений между текущей точкой маршрута и соответствующей ей ячейкой.

Алгоритм формирования заданий можно представить в виде следующих шагов.

- 1) выбор поля  $F_i$  и необходимой для выполнения технологической операции  $\hat{S}$ .
- 2) вывод доступных для использования комбинаций БПТС, средств обработки и материалов  $\left\{ \langle \hat{V}_{im}, \hat{T}_{im}, \hat{M}_{im} \rangle_{m=1}^M \right\} \in \hat{S}$ .
- 3) выбор необходимой комбинации  $\langle \hat{V}_{im}, \hat{T}_{im}, \hat{M}_{im} \rangle$ .
- 4) для выбранного БПТС  $V_j = \langle \hat{V}_{im}, \hat{T}_{im} \rangle$  формируется маршрут передвижения по  $i$ -му полю  $F_i$  в виде множества точек  $P_{ij}^T$  [18].
- 5) на основе характеристик выбранного БПТС  $V_j$  формируется множество ячеек поля с указанием их границ  $G_{ij}^T = \left\{ \langle B_{ijk}^G \rangle_{k=1}^K \right\}$ . Ячейка  $G_{ijk}^T \in G_{ij}^T$  представляет собой квадрат, сторона которого равна ширине средства обработки БПТС  $V_j$ .
- 6) формируется множество отношений  $R_{ij}^T$  между каждой точкой маршрута и соответствующей ей ячейкой.
- 7) для  $k$ -й ячейки  $G_{ijk}^T \in G_{ij}^T$  на основе процесса НЛВ БЗ  $A$  выполняется формирование множества управляющих сигналов  $A: (\hat{A}_i^F \cap B_{ijk}^G) \times (D_i^F \cap B_{ijk}^G) \times \hat{I} \times \hat{M}_{im} \rightarrow \left\{ \langle key_{ijkl}^G, value_{ijkl}^G \rangle_{k=1}^L \right\}$ ,  $G_{ijk}^T = \langle B_{ijk}^G, \left\{ \langle key_{ijkl}^G, value_{ijkl}^G \rangle_{l=1}^L \right\} \rangle$ . Входными данными процесса НЛВ являются данные агрохимического обследования  $\hat{A}_i^F \cap B_{ijk}^G$  и сведения о заражённых участках  $D_i^F \cap B_{ijk}^G$  в текущей ячейке с учётом соответствия координат, а также дополнительные сведения  $\hat{I}$  (тип сельскохозяйственной культуры и сезон проведения технологической операции) и выбранный материал  $\hat{M}_{im}$  (удобрения, химикаты и т.д.).

В результате формируется задание для системы управления БПТС, в т.ч. координаты маршрута передвижения по полю и множество управляющих сигналов для средства обработки с привязкой к отдельным участкам поля с учётом характеристики почвы и заболеваний сельскохозяйственной культуры.

### 3 База знаний и организация нечёткого логического вывода

БЗ  $A$  системы управления БПТС можно представить в виде:  $A = \langle OWL, SWRL, Pellet, SWRLF \rangle$ , где  $OWL$  – онтология на языке  $OWL 2^5$  для описания структуры БЗ;  $SWRL$  – множество продукционных правил на языке  $SWRL^6$ ;

$Pellet$  – машина логического вывода  $Pellet^7$ ;

$SWRLF$  – разработанный компонент для осуществления процесса НЛВ на основе БЗ [19].

<sup>5</sup> <https://www.w3.org/TR/owl2-overview/>.

<sup>6</sup> <https://www.w3.org/submissions/SWRL/>.

<sup>7</sup> <https://www.w3.org/2001/sw/wiki/Pellet>

### 3.1 Структура онтологии

Схема онтологии *OWL* представлена на рисунке 1<sup>8</sup>. Структура компонента *OWL* БЗ А для формирования задания по внесению удобрений представлена с использованием диалекта дескрипционной логики *SHOIQF(D)*<sup>9</sup> [20].

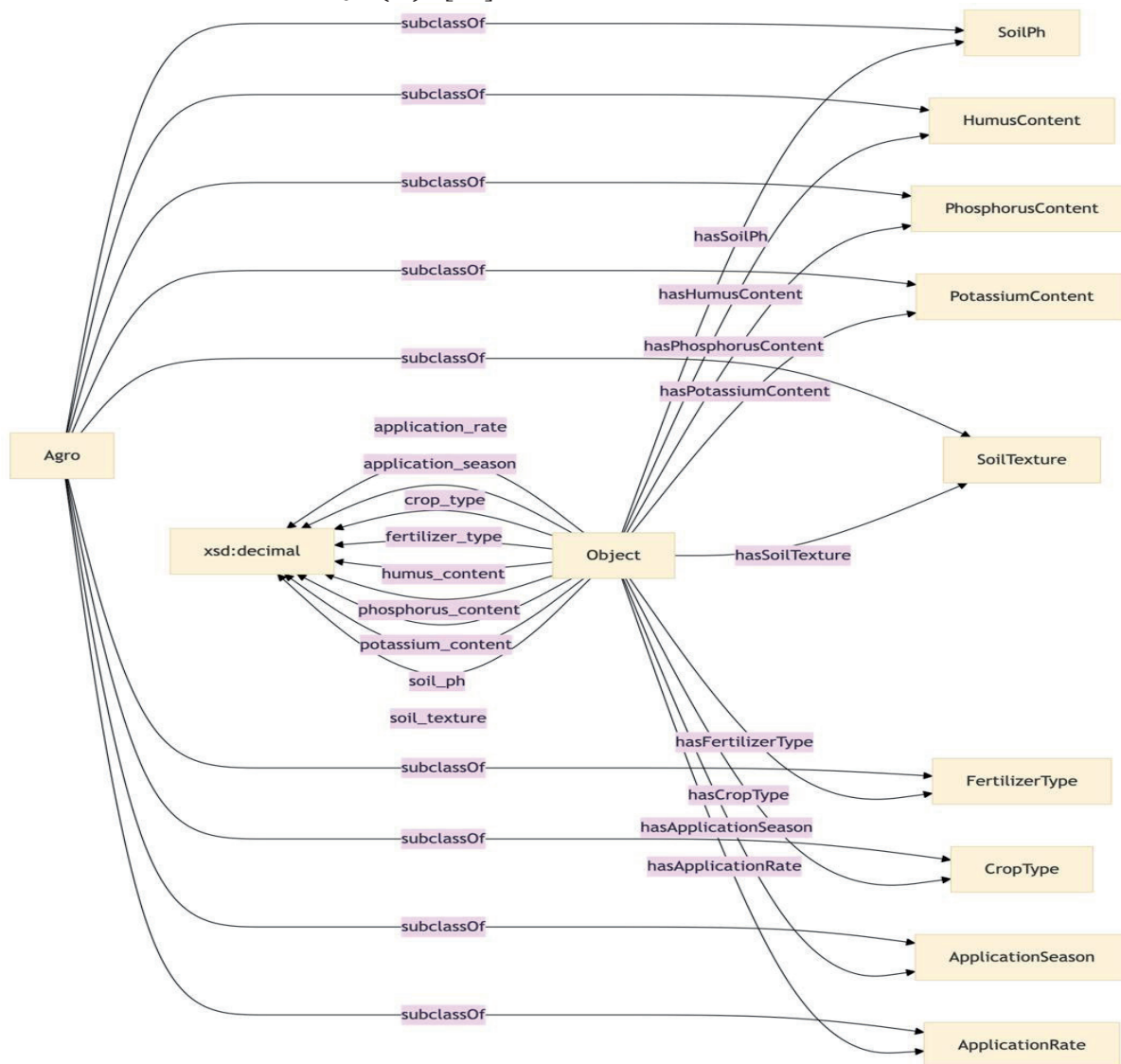


Рисунок 1 – Схема онтологии

Структура компонента *OWL* содержит описание следующих классов:

- класс  $Agro \equiv T$  описывает набор характеристик почвы  $key^{\hat{A}}$ , типов управляющих сигналов  $key^G$  для средства обработки БПТС  $V_j$ , а также дополнительные сведения  $\hat{I}$ : тип сельскохозяйственной культуры и сезон проведения технологической операции;
- класс  $Object \equiv T$  описывает ячейку  $G_{ijk}^T$  некоторого поля  $F_i$  в рамках задания  $T_{ij}$  для системы управления БПТС.

Классы *Agro* и *Object* объявлены непересекающимися  $Agro \sqcap Object \sqsubseteq \perp$ .

<sup>8</sup> Для повышения компактности и читаемости по сравнению со средствами визуализации редактора *Protégé (OntoGraf)* схема выполнена с помощью сервиса *Mermaid* (<https://mermaid.live>).

<sup>9</sup> [https://en.wikipedia.org/wiki/Description\\_logic#Naming\\_convention](https://en.wikipedia.org/wiki/Description_logic#Naming_convention).

Класс *Object* содержит следующие функциональные свойства данных для определения чётких значений результатов агрохимического обследования почвы [21]:

- *soilPh* – показатель кислотности (рН) почвы в единицах по шкале от 1 до 14;
- *humusContent* – показатель содержания гумуса в почве;
- *phosphorusContent* – содержание фосфора в почве;
- *potassiumContent* – содержание калия в почве;

$Object \sqsubseteq = 1 \text{ soilPh. Decimal } \sqcap = 1 \text{ humusContent. Decimal } \sqcap$   
 $\sqcap = 1 \text{ phosphorusContent. Decimal } \sqcap = 1 \text{ potassiumContent. Decimal}.$

Класс *ApplicationSeason*  $\equiv$  *Agro*  $\sqcap$  {Autumn, Spring, Vegetation} используется для описания сезона проведения технологической операции: осень, весна, вегетация.

Описания результатов агрохимического обследования почвы *key*<sup>A</sup> в виде качественных (нечётких) значений имеют вид [21]:

- *SoilPh*  $\equiv$  *Agro*  $\sqcap$  {Acidic, Alkaline, Neutral} описывает уровень кислотности (рН) почвы: кислотная, щелочная, нейтральная;
- *HumusContent*  $\equiv$  *Agro*  $\sqcap$  {HLow, HMedium, HHigh} описывает процент содержания гумуса в почве: низкий, средний, высокий;
- *PhosphorusContent*  $\equiv$  *Agro*  $\sqcap$  {PhDeficient, PhSufficient, PhHigh} описывает уровень содержания фосфора в почве: недостаточный, достаточный, высокий;
- *PotassiumContent*  $\equiv$  *Agro*  $\sqcap$  {PoDeficient, PoSufficient, PoHigh} описывает уровень содержания калия в почве: недостаточный, достаточный, высокий;
- *SoilTexture*  $\equiv$  *Agro*  $\sqcap$  {Light, Medium, Heavy} описывает механический состав почвы как соотношение глины, ила и песка: легкий (песчаная, супесчаная), средний (суглинок) и тяжелый (глинистая);
- *FertilizerType*  $\equiv$  *Agro*  $\sqcap$  {Nitrogen, Phosphorus, Potassium} описывает тип удобрения: азотные, фосфорные и калийные;
- тип сельскохозяйственной культуры: чувствительная к хлору (картофель, ягоды, лук), зерновая (пшеница, ячмень), бобовая (горох, соя), овощная; представлен перечисляемым классом *CropType*  $\equiv$  *Agro*  $\sqcap$  {ChlorineSensitive, Grain, Legume, Vegetable};

Для описания нормы внесения удобрений (от 0–300 кг/га, универсальный диапазон может покрыть большинство типов удобрений) в качестве примера типа управляющего сигнала *key*<sup>G</sup> для средства обработки БПТС *V<sub>j</sub>* используется свойство данных *applicationRate*:

$Object \sqsubseteq = 1 \text{ applicationRate. Decimal}.$

Для описания данного показателя в виде качественных значений используется следующий перечисляемый класс:

*ApplicationRate*  $\equiv$  *Agro*  $\sqcap$  {RNone, RReduced, RMedium, RIncreased, RHigh, RVeryHigh}.

Для организации отношений между классом *Object* и объявленными перечисляемыми классами созданы следующие функциональные объектные свойства:

$Object \sqsubseteq = 1 \text{ hasSoilPh. SoilPh } \sqcap = 1 \text{ hasHumusContent. HumusContent } \sqcap$   
 $\sqcap = 1 \text{ hasPhosphorusContent. PhosphorusContent } \sqcap$   
 $\sqcap = 1 \text{ hasPotassiumContent. PotassiumContent } \sqcap$   
 $\sqcap = 1 \text{ hasSoilTexture. SoilTexture } \sqcap = 1 \text{ hasFertilizerType. FertilizerType}$   
 $\sqcap = 1 \text{ hasCropType. CropType } \sqcap = 1 \text{ hasApplicationSeason. ApplicationSeason}$   
 $\sqcap = 1 \text{ hasApplicationRate. ApplicationRate}.$

На основе описанной структуры онтологии формируется множество продукционных правил на языке *SWRL* для организации НЛВ.

### 3.2 Продукционные правила

Компонент *SWRL* БЗ А системы управления БПТС позволяет описывать экспертные знания на основе качественных (нечётких) значений для сокращения времени наполнения БЗ. Например, правила определения нормы внесения азотных удобрений имеют вид [21]:

$\text{hasApplicationSeason}(?o, Autumn) \wedge \text{hasSoilTexture}(?o, Light)$   
 $\wedge \text{hasFertilizerType}(?o, Nitrogen) \rightarrow \text{hasApplicationRate}(?o, RNone)$

```

hasHumusContent(?o, HHigh) ^ hasFertilizerType(?o, Nitrogen) ->
-> hasApplicationRate(?o, RReduced)
hasCropType(?o, Legume) ^ hasFertilizerType(?o, Nitrogen) ->
-> hasApplicationRate(?o, RReduced)
hasCropType(?o, Grain) ^ hasHumusContent(?o, HLow) ^ hasApplicationSeason(?o, Spring) ^
^ hasFertilizerType(?o, Nitrogen) -> hasApplicationRate(?o, RHigh)
hasCropType(?o, Vegetable) ^ hasApplicationSeason(?o, Vegetation) ^
^ hasFertilizerType(?o, Nitrogen) -> hasApplicationRate(?o, RMedium).

```

Для обеспечения корректности и непротиворечивости продукционных правил проведена их валидация. На первом этапе полученный набор *SWRL*-правил проверялся с помощью встроенных средств редактора *Protégé*. На втором этапе агроном проверил правильность задания норм внесения удобрений для различных комбинаций кислотности и плодородия почв.

Агроном или инженер по знаниям может добавлять новые классы и корректировать коэффициенты НЛВ без изменения программного кода алгоритма НЛВ. В качестве направления развития системы рассматривается применение методов машинного обучения (например, на основе анализа дерева решений) [22]. Это позволит автоматически корректировать БЗ на основе накопленных исторических данных.

### 3.3 Нечёткий логический вывод

Для определения параметров и настроек алгоритма НЛВ с помощью *SWRLF* используются *OWL*-аннотации [19]:

- *fuzzyInference* – определение алгоритма НЛВ, применяется к онтологии (рисунок 2а).
- *fuzzyInferenceConjunction*, *fuzzyInferenceDisjunction*, *fuzzyInferenceImplication* – ручное определение параметров алгоритма НЛВ: реализация оператора И, реализация оператора ИЛИ, функция активизации; применяются к онтологии и переопределяют настройки для выбранного алгоритма (рисунок 2а).
- *fuzzyInputVariable* – определение входных переменных; применяется к свойствам онтологии (рисунок 2б).
- *fuzzyOutputVariable* – определение параметра для вычисления в процессе НЛВ; применяется к свойствам онтологии (рисунок 2в).
- *fuzzyOutputVariableDefuzzifier* – ручное определение функции дефаззификации; применяется к свойствам онтологии с аннотацией *fuzzyOutputVariable* и переопределяет настройки для выбранного алгоритма (рисунок 2в).
- *fuzzyVariableMinimum*, *fuzzyVariableMaximum* – определение интервала допустимых значений переменной; применяются к свойствам онтологии с аннотациями *fuzzyInputVariable* или *fuzzyOutputVariable* (рисунок 2в).
- *fuzzyTerm* – определение терм лингвистической переменной; применяется к индивидуальности онтологии. Данная аннотация также позволяет выбрать вид функции принадлежности для фаззификации значения входной переменной (рисунок 2г).

В качестве входных переменных для алгоритма НЛВ с помощью аннотации *fuzzyInputVariable* обозначены следующие свойства класса *Object*: *soilPh*, *humusContent*, *phosphorusContent*, *potassiumContent*, *hasSoilTexture*, *hasFertilizerType*, *hasCropType*, *hasApplicationSeason*.

Выходной переменной с помощью аннотации *fuzzyOutputVariable* обозначено свойство *applicationRate*.

Для каждого лингвистического термина с помощью аннотации *fuzzyTerm* указана связь с соответствующей входной или выходной переменной, а также настройки функции принадлежности для выполнения процесса фаззификации или дефаззификации.

Таблица 1 содержит описание настроек для всех лингвистических термов. Используются кусочно-линейные (треугольные и трапециевидные) функции принадлежности для лингвистических термов. Параметры функций (координаты вершин треугольников и трапеций) определены на основе анализа отраслевых агрохимических справочников и уточнены в ходе экспертных консультаций с агрономами.

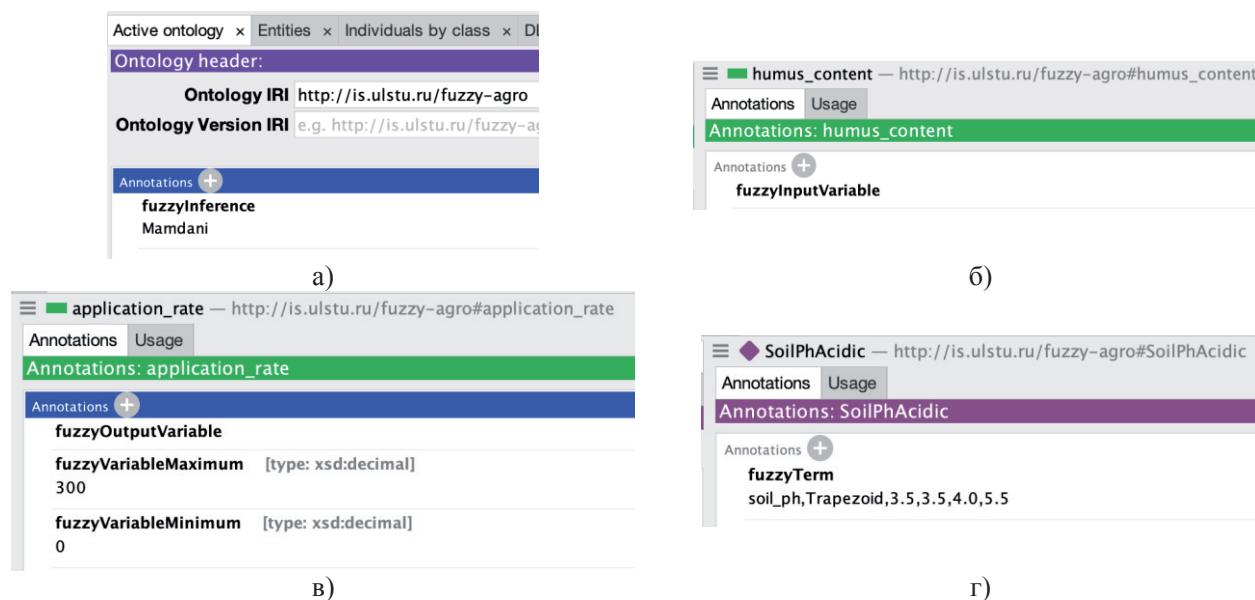


Рисунок 2 – Пример использования аннотаций для настройки параметров нечёткого логического вывода:

- а) добавление аннотации для онтологии;
- б) добавление аннотации для свойства данных в качестве входной переменной;
- в) добавление аннотации для свойства данных в качестве выходной переменной;
- г) добавление аннотации для индивидуальности в качестве лингвистической переменной

Значения объектных свойств индивидуальности перечисляемых классов обозначаются лингвистическими термами с помощью аннотации *fuzzyTerm*. Значение функции принадлежности определяется автоматически: у выбранного терма степень принадлежности равна 1, у остальных – ноль.

#### 4 Пример

Система управления БПТС представляет собой комплексное программное обеспечение, которое состоит из следующих компонентов:

- Учётная система «1С:Предприятие 8. ERP Агропромышленный комплекс»<sup>10</sup> позволяет получить сведения о полях, технологических операциях, доступных транспорт-

Таблица 1 – Настройки лингвистических термов

Переменная	Лингвистический терм	Функция принадлежности
soilPh	Acidic	Trapezoid(3.5, 3.5, 4.0, 5.5)
	Neutral	Triangle(5.2, 6.0, 7.2)
	Alkaline	Trapezoid(6.8, 7.8, 9.0, 9.0)
humusContent	HLow	Trapezoid(0, 0, 1.5, 2.5)
	HMedium	Triangle(1.5, 2.5, 4.5)
	HHigh	Trapezoid(3.5, 4.5, 6.0, 6.0)
phosphorusContent	PhDeficient	Trapezoid(0, 0, 30, 80)
	PhSufficient	Triangle(50, 100, 180)
	PhHigh	Trapezoid(150, 200, 250, 250)
potassiumContent	PoDeficient	Trapezoid(0, 0, 60, 120)
	PoSufficient	Triangle(80, 140, 220)
	PoHigh	Trapezoid(180, 240, 300, 300)
applicationRate	RNone	Trapezoid(0, 0, 10, 30)
	RReduced	Triangle(20, 60, 100)
	RMedium	Triangle(80, 120, 160)
	RIncreased	Triangle(140, 180, 220)
	RHigh	Triangle(200, 240, 280)
	RVeryHigh	Trapezoid(260, 280, 300, 300)

<sup>10</sup> <https://solutions.1c.ru/catalog/erpack>.

ных средствах и средствах обработки.

- Географическая информационная система (ГИС) «Разметка сельскохозяйственных полей» позволяет формировать электронные карты полей с учётом различных свойств слоёв: препятствия, болезни, данные агрохимического обследования.
- Модуль формирования заданий для БПТС [18].
- БЗ позволяет накапливать экспертные знания для решения задачи автономного управления БПТС [10].

Для интеграции разработанных программных решений с учётной системой сельхозпредприятия реализовано расширение для конфигурации «1С:Предприятие 8. ERP Агропромышленный комплекс», обеспечивающее обмен данными через *REST API*<sup>11</sup> по протоколу *HTTP*. Использование штатного механизма расширений платформы 1С: Предприятие 8<sup>12</sup> гарантирует бесшовное включение компонента обмена в любую информационную базу на основе указанной конфигурации без изменения её кода. Разработанное расширение взаимодействует с объектами метаданных подсистемы «Растениеводство»<sup>13</sup> для извлечения сведений о характеристиках полей, возделываемых сельхозкультурах, планируемых технологических операциях, доступных транспортных средствах, средствах обработки и расходных материалах.

Пример формирования области для ввода данных агрохимического обследования представлен на рисунке 3, в котором некоторая ячейка поля определена в качестве индивидуальности *object* класса *Object* со следующими значениями показателей результатов агрохимического обследования:

*object: Object*

*(object, 5.0): soilPh*      *(object, 1.8): humusContent*      *(object, 45): phosphorusContent*  
*(object, 110): potassiumContent*      *(object, Heavy): hasSoilTexture*.

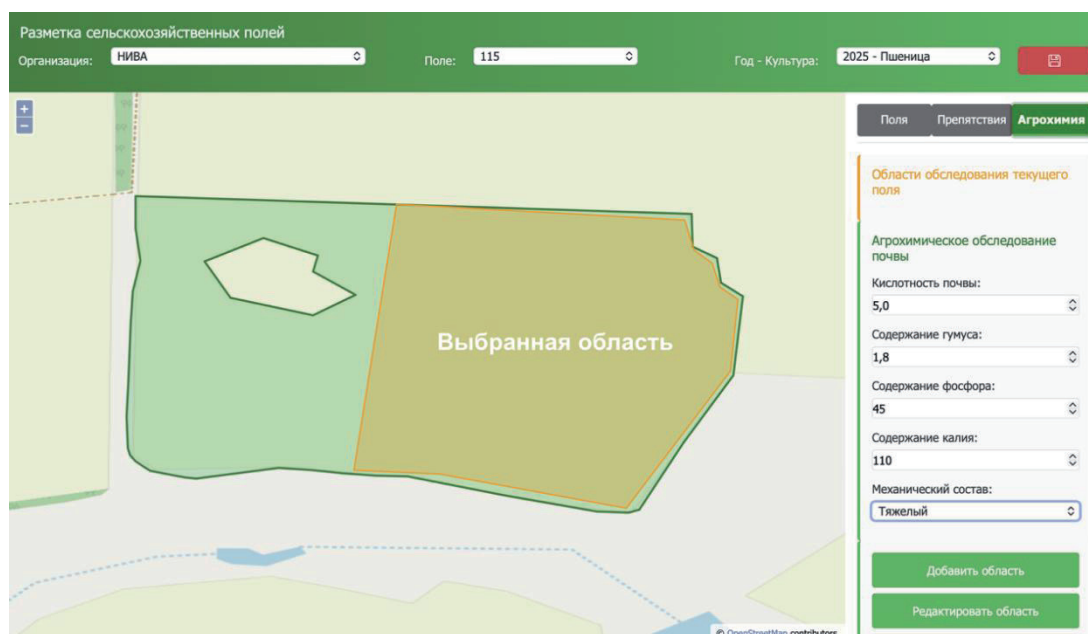


Рисунок 3 – Пример ввода данных агрохимического обследования для выбранной области поля

Тип сельскохозяйственной культуры (пшеница), сезон проведения технологической операции (весна) и тип удобрения (азотные) задаются на основе данных из учётной системы: *(object, Grain): hasCropType*, *(object, Nitrogen): hasFertilizerType*,

<sup>11</sup> <https://restapitutorial.ru>.

<sup>12</sup> <https://v8.1c.ru/platforma/rasshireniya/>.

<sup>13</sup> <https://solutions.1c.ru/catalog/erpapk/rastenievodstvo>.

(*object, Spring*): *hasApplicationSeason*.

В результате выполнения этапа фаззификации для обозначенных входных переменных получены результаты, которые представлены в таблице 2.

По результатам выполнения этапов агрегации и активации рассчитаны степени уверенности для антецедентов и консеквентов продукционных *SWRL*-правил, выполнено следующее правило со степенью уверенности консеквента 0.7:

$hasCropType(?o, Grain) \wedge hasHumusContent(?o, HLow) \wedge hasApplicationSeason(?o, Spring) \wedge hasFertilizerType(?o, Nitrogen) \rightarrow hasApplicationRate(?o, RHigh)$

В результате выполнения аккумуляции и дефаззификации в онтологию добавлена аксиома (*object, 239.9*): *application\_rate*. Таким образом, норма внесения удобрений составила 239.9 кг/га.

Для оценки эффективности предложенного подхода проведено сравнительное моделирование процесса внесения минеральных удобрений (аммиачной селитры) для участка поля площадью 40 га. Сравнение проводилось между традиционным методом (внесение по средней норме на поле) и предлагаемым методом внесения на основе механизма НЛВ с учётом разбиения поля на ячейки.

Параметры эксперимента:

- традиционный метод: средняя норма внесения – 150 кг/га (усреднённый показатель по результатам агрохимического обследования всего поля); итоговый расход: 6000 кг.
- предлагаемый метод: расчёт индивидуальной нормы для каждой ячейки (60х60 м) на основе БЗ (рН, содержание фосфора и калия).

В результате применения алгоритма НЛВ для 25% ячеек (участки с высоким содержанием питательных веществ) норма была снижена до 110–120 кг/га, а для 10% (дефицитные участки) – повышена до 170 кг/га.

Суммарный расход удобрений составил 5580 кг, что на 7% ниже традиционного метода при сохранении целевого агрономического эффекта. Среднеквадратичное отклонение расчётной нормы от экспертных рекомендаций агронома составило не более 2,4%.

Важным условием практического применения предложенного подхода является его невысокая вычислительная сложность, особенно при обработке массивов данных для полей большой площади (тысячи гектаров). В ходе экспериментальной оценки прототипа программного модуля, реализованного на языке *Java*, установлено, что:

- около 1 секунды требуется на запуск виртуальной машины и загрузку *OWL*-онтологии;
- среднее время выполнения логического вывода для одной ячейки поля в рамках одной сессии составляет не более 15–20 мс на процессоре с тактовой частотой 2.5 ГГц.

Время формирования полной карты-задания для типичного поля площадью 100 га, состоящего из 278 ячеек, составляет около 5 секунд.

Таблица 2 – Результаты фаззификации

Переменная	Лингвистический терм	Степень принадлежности
<i>soilPh</i>	<i>Acidic</i>	0.333
	<i>Neutral</i>	0.0
	<i>Alkaline</i>	0.0
<i>humusContent</i>	<i>HLow</i>	0.7
	<i>HMedium</i>	0.3
	<i>HHigh</i>	0.0
<i>phosphorusContent</i>	<i>PhDeficient</i>	0.7
	<i>PhSufficient</i>	0.0
	<i>PhHigh</i>	0.0
<i>potassiumContent</i>	<i>PoDeficient</i>	0.167
	<i>PoSufficient</i>	0.5
	<i>PoHigh</i>	0.0
<i>hasSoilTexture</i>	<i>Light</i>	0.0
	<i>Medium</i>	0.0
	<i>Heavy</i>	1.0
<i>hasFertilizerType</i>	<i>Nitrogen</i>	1.0
	<i>Phosphorus</i>	0.0
	<i>Potassium</i>	0.0
<i>hasCropType</i>	<i>ChlorineSensitive</i>	0.0
	<i>Grain</i>	1.0
	<i>Legume</i>	0.0
	<i>Vegetable</i>	0.0
<i>hasApplicationSeason</i>	<i>Autumn</i>	0.0
	<i>Spring</i>	1.0
	<i>Vegetation</i>	0.0

## Заключение

В статье представлен комплексный подход к автоматизации управления БПТС в точном земледелии, основанный на применении онтологии, БЗ и НЛВ.

Основные результаты работы включают:

- 1) формальную постановку задачи формирования заданий для БПТС, учитывающую пространственные данные, агрономические требования и технические ограничения;
- 2) ГИС с поддержкой многослойного представления электронной карты поля;
- 3) структуру БЗ на основе *OWL*-онтологии, *SWRL*-правил и механизма НЛВ;
- 4) алгоритм формирования заданий для БПТС.

Преимуществами предложенного подхода являются возможность учёта качественных (нечётких) экспертных оценок, адаптивность к изменяющимся условиям, интеграция с существующими учётными системами сельхозпредприятия на базе конфигурации «1С:Предприятие 8. ERP Агропромышленный комплекс».

Ограничения и недостатки включают: зависимость качества решений от полноты БЗ, необходимость ручного конфигурирования продукционных правил, технические погрешности позиционирования БПТС.

В рассмотренном примере суммарный расход удобрений при использовании предложенного подхода на 7% ниже по сравнению с традиционным методом при сохранении целевого агрономического эффекта. Среднеквадратичное отклонение расчётной нормы от экспертных рекомендаций агронома составило не более 2,4%.

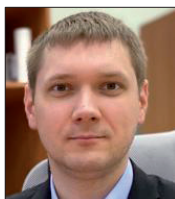
Предложенная структура онтологии может быть адаптирована для решения смежных задач точного земледелия путём расширения БЗ без изменения логики работы системы.

## Список источников

- [1] *Широбокова А.А., Мохаммад Д.А., Руднев С.Г.* Перспективы автоматизации систем управления в агропромышленном комплексе России. *Журнал прикладных исследований*. 2024. №11. С.23–27. DOI: 10.47576/2949-1878.2024.11.11.003.
- [2] *Zhai Z., Martínez J.F., Beltran V., Martinez N.L.* Decision support systems for agriculture 4.0: Survey and challenges. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2020. Vol.170. P.105256. DOI: 10.1016/j.compag.2020.105256.
- [3] *Lakhiar I.A., Jianmin G., Syed T.N., Chandio F.A., Buttar N.A., Qureshi W.A.* Monitoring and control systems in agriculture using intelligent sensor techniques: A review of the aeroponic system. *Journal of sensors*. 2018. Vol.2018. №1. P.8672769. DOI: 10.1155/2018/8672769.
- [4] *Ju C., Son H.I.* Multiple UAV systems for agricultural applications: Control, implementation, and evaluation. *Electronics*. 2018. Vol.7. №9. P.162. DOI: 10.3390/electronics7090162.
- [5] *Kim J., Kim S., Ju C., Son H.I.* Unmanned aerial vehicles in agriculture: A review of perspective of platform, control, and applications. *IEEE Access*. 2019. Vol.7. P.105100–105115. DOI: 10.1109/ACCESS.2019.2932119.
- [6] *Hassan S.I., Alam M.M., Illahi U., Al Ghamdi M.A., Almotiri S.H., Su'ud M.M.* A systematic review on monitoring and advanced control strategies in smart agriculture. *IEEE Access*. 2021. Vol.9. P.32517–32548. DOI: 10.1109/ACCESS.2021.3057865.
- [7] *Акимов С.С., Болодурина И.П.* Построение СППР на основе онтологии молочного производства. *Онтология проектирования*. 2021. Т.11. №1(29). С.64–75. DOI: 10.18287/2223-9537-2021-11-1-64-75.
- [8] *Боргест Н.М., Будаев Д.В., Травин В.В.* Онтология проектирования точного земледелия: состояние вопроса, пути решения. *Онтология проектирования*. 2017. Т.7. №4(26). С.423–442. DOI: 10.18287/2223-9537-2017-7-4-423-442.
- [9] *Семенов А.И., Соколов Б.В., Спасивцев А.В.* Комплексный подход к решению задач планирования в кормопроизводстве. *Онтология проектирования*. 2025. Т.15. №2(56). С.198–210. DOI: 10.18287/2223-9537-2025-15-2-198-210.
- [10] *Романов А.А., Рубцов И.А., Святков К.В., Филиппов А.А.* Подход к построению базы знания для программного управления беспилотными транспортными средствами. *Онтология проектирования*. 2024. Т.14. № 1(51). С.117–128. DOI: 10.18287/2223-9537-2024-14-1-117-128.

- [11] **Рубцов И.А., Житков Р.В., Михайлов В.С., Святлов К.В.** Модели и средства проектирования подсистемы исполнения команд высокоавтоматизированного транспортного средства. *Автоматизация процессов управления*. 2024. № 1(75). С.89–96. DOI: 10.35752/1991-2927\_2024\_1\_75\_89.
- [12] **Bhuyan B.P., Tomar R., Cherif A.R.** A systematic review of knowledge representation techniques in smart agriculture (urban). *Sustainability*. 2022. Vol.14. №.22. P.15249. DOI: 10.3390/su142215249.
- [13] **Song C., Ma W., Li J., Qi B., Liu B.** Development trends in precision agriculture and its management in China based on data visualization. *Agronomy*. 2022. Vol.12. №.11. P. 2905. DOI: 10.3390/agronomy12112905.
- [14] **Symeonaki E., Arvanitis K.G., Piromalis D., Tseles D., Balafoutis A.T.** Ontology-based IoT middleware approach for smart livestock farming toward agriculture 4.0: A case study for controlling thermal environment in a pig facility. *Agronomy*. 2022. Vol.12. №.3. P. 750. DOI: 10.3390/agronomy12030750.
- [15] **San Emeterio de la Parte M., Lana Serrano S., Muriel Elduayen M., Martínez-Ortega J.F.** Spatio-temporal semantic data model for precision agriculture IoT networks. *Agriculture*. 2023. Vol.13. №.2. P. 360. DOI: 10.3390/agriculture13020360.
- [16] **Senapaty M.K., Ray A., Padhy N.** IoT-enabled soil nutrient analysis and crop recommendation model for precision agriculture. *Computers*. 2023. Vol.12. №.3. P.61. DOI: 10.3390/computers12030061.
- [17] **Wilson S.I., Goonetillake J.S., Ginige A., Walisadeera A.I.** Towards a usable ontology: the identification of quality characteristics for an ontology-driven decision support system. *IEEE Access*. 2022. Vol. 10. P.12889–12912. DOI: 10.1109/ACCESS.2022.3146331.
- [18] **Filippov A., Gilmetdinova E., Romanov A.** Development of an Algorithm for Path Planning for Highly Autonomous Agricultural Vehicles. *2025 International Russian Automation Conference (RusAutoCon)*. IEEE, 2025. P.431–436. DOI: 10.1109/RusAutoCon65989.2025.11177433.
- [19] **Filippov A., Romanov A.** Construction of a Fuzzy Logical Inference System Based on Semantic Web Technologies. *2024 International Russian Automation Conference (RusAutoCon)*. IEEE, 2024. P.768–773, DOI: 10.1109/RusAutoCon61949.2024.10694476.
- [20] *The description logic handbook: Theory, implementation and applications / F. Baader (ed.)*. UK, Cambridge : Cambridge university press, 2003. 622 p.
- [21] **Ягодин Б.А., Жуков Ю.П., Кобзаренко В.И.** *Агрохимия*. 5-е изд., стер. Санкт-Петербург: Лань, 2025. 584 с.
- [22] **Romanov A.A., Filippov A.A., Yarushkina N.G.** An approach to generating fuzzy rules for a fuzzy controller based on the decision tree interpretation. *Axioms*. 2025. Vol.14(3). P.196. DOI: 10.3390/axioms14030196.

## Сведения об авторах



**Романов Антон Алексеевич**, 1986 г. рождения. Окончил УлГТУ в 2009 г., к.т.н. (2013). Заведующий кафедрой «Информационные системы» УлГТУ. Член Российской ассоциации искусственного интеллекта. В списке научных трудов более 120 работ в области анализа данных и процессов. Author ID (РИНЦ): 684949; Author ID (Scopus): 55903279200. [romanov73@gmail.com](mailto:romanov73@gmail.com).

**Филиппов Алексей Александрович**, 1987 г. рождения. Окончил УлГТУ в 2009 г., к.т.н. (2013). Доцент кафедры «Информационные системы» УлГТУ.

Член Российской ассоциации искусственного интеллекта. В списке научных трудов более 120 работ в области инженерии знаний и анализа данных. Author ID (РИНЦ): 708454; Author ID (Scopus): 57191472723. [al.al.filippov@gmail.com](mailto:al.al.filippov@gmail.com). ✉



Поступила в редакцию 24.11.2025, после рецензирования 14.05.2026. Принята к публикации 18.05.2026.



## Automation of unmanned vehicle control in precision agriculture

© 2026, A.A. Romanov, A.A. Filippov ✉

*Ulyanovsk State Technical University (UISTU), Ulyanovsk, Russia*

### Abstract

This paper examines the automation of unmanned vehicle control in precision agriculture. Based on a domain ontology, a comprehensive approach to generating tasks, including the trajectory and control signals for agricultural field treatment equipment, is proposed. A software system has been developed, comprising a geographic information system for creating electronic field maps, a task generation algorithm, and a fuzzy inference module based on ontologies and production rules. A distinctive feature of this approach is the formalization of agronomists' expert knowledge, making it possible to take into account soil and climate conditions, crop characteristics, and parameters of technological operations. An ontology structure for describing technological field treatment operations and a fuzzy inference mechanism for calculating fertilizer application rates are presented, enabling consideration of the characteristics of a specific field area, agricultural crop, and technological operation being performed. An extension for the configuration 1C:ERP Agro-Industrial Complex was developed to integrate the proposed software system with the accounting system of an agricultural enterprise. An example of applying the system to calculate fertilizer application rates for grain crops is described. The results demonstrated that the total fertilizer consumption was 7% lower when using the proposed approach compared to the traditional method.

**Keywords:** *unmanned vehicle, ontology, fuzzy inference, control automation, technological operation, precision agriculture.*

**For citation:** *Romanov AA, Filippov AA. Automation of unmanned vehicle control in precision agriculture [In Russian]. *Ontology of designing*. 2026; 16(2): 255-268. DOI:10.18287/2223-9537-2026-16-2-255-268.*

**Acknowledgment:** The authors express their gratitude to the management of Agroservice IT Group.

**Financial Support:** This work was supported by the Russian Science Foundation (project No. 23-11-00265).

**Authors' contributions:** *Filippov A.A.* – problem formulation, concept development, model formalization. *Romanov A.A.* – expert evaluation of materials, software system development, verification of results.

**Conflict of interest:** The authors declare no conflict of interest.

### List of figures and tables

Figure 1 – Ontology scheme

Figure 2 – Example of using annotations to configure fuzzy inference parameters: a) adding an annotation for the ontology; b) adding an annotation for a data property as an input variable; c) adding an annotation for a data property as an output variable; d) adding an annotation for an individual as a linguistic variable

Figure 3 – Example of inputting agrochemical survey data for a selected field area

Table 1 – Settings of linguistic terms

Table 2 – Fuzzification results

### References

- [1] *Shirobokova AA, Mukhammed DA, Rudnev SG.* Prospects for automation of control systems in the agro-industrial complex of Russia [In Russian]. *Journal of Applied Research*. 2024; (11): 23–27. DOI: 10.47576/2949-1878.2024.11.11.003.
- [2] *Zhai Z, Martínez JF, Beltran V, Martinez NL* Decision support systems for agriculture 4.0: Survey and challenges. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2020; 170: 105256. DOI: 10.1016/j.compag.2020.105256.
- [3] *Lakhiar IA, Jianmin G, Syed TN, Chandio FA, Buttar NA, Qureshi WA.* Monitoring and control systems in agriculture using intelligent sensor techniques: A review of the aeroponic system. *Journal of Sensors*. 2018; 2018(1): 8672769. DOI: 10.1155/2018/8672769.
- [4] *Ju C, Son HI.* Multiple UAV systems for agricultural applications: Control, implementation, and evaluation. *Electronics*. 2018; 7(9): 162. DOI: 10.3390/electronics7090162.

- [5] **Kim J, Kim S, Ju C, Son HI.** Unmanned aerial vehicles in agriculture: A review of perspective of platform, control, and applications. *IEEE Access.* 2019; 7: 105100–105115. DOI: 10.1109/ACCESS.2019.2932119.
- [6] **Hassan SI, Alam MM, Illahi U, Al Ghamdi MA, Almotiri SH, Su'ud MM.** A systematic review on monitoring and advanced control strategies in smart agriculture. *IEEE Access.* 2021; 9: 32517–32548. DOI: 10.1109/ACCESS.2021.3057865.
- [7] **Akimov SS, Bolodurina IP.** DSS construction based on the ontology of dairy production [In Russian]. *Ontology of Designing.* 2021; 11(1): 64–75. DOI: 10.18287/2223-9537-2021-11-1-64-75.
- [8] **Borgest NM, Budaev DV, Travin VV.** Ontology of precision agriculture design: problem state, solution approaches [In Russian]. *Ontology of Designing.* 2017; 7(4): 423–442. DOI: 10.18287/2223-9537-2017-7-4-423-442.
- [9] **Semenov AI, Sokolov BV, Spesivtsev AV.** An integrated approach to solving planning problems in forage production [In Russian]. *Ontology of Designing.* 2025; 15(2): 198–210. DOI: 10.18287/2223-9537-2025-15-2-198-210.
- [10] **Romanov AA, Rubtsov IA, Svyatov KV, Filippov AA.** Building a knowledge base for autonomous control of unmanned vehicles [In Russian]. *Ontology of Designing.* 2024; 14(1): 117–128. DOI: 10.18287/2223-9537-2024-14-1-117-128.
- [11] **Rubtsov IA, Zhitkov RV, Mikhailov VS, Sviatov KV.** Models and tools for designing the command execution subsystem of a highly automated vehicle [In Russian]. *Automation of Control Processes.* 2024; 1(75): 89–96. DOI: 10.35752/1991-2927\_2024\_1\_75\_89.
- [12] **Bhuyan BP., Tomar R, Cherif AR.** A systematic review of knowledge representation techniques in smart agriculture (urban). *Sustainability.* 2022; 14(22): 15249. DOI: 10.3390/su142215249.
- [13] **Song C, Ma W, Li J, Qi B, Liu B.** Development trends in precision agriculture and its management in China based on data visualization. *Agronomy.* 2022; 12(11): 2905. DOI: 10.3390/agronomy12112905.
- [14] **Symeonaki E., Arvanitis KG, Piromalis D, Tseles D, Balafoutis AT.** Ontology-based IoT middleware approach for smart livestock farming toward agriculture 4.0: A case study for controlling thermal environment in a pig facility. *Agronomy.* 2022; 12(3): 750. DOI: 10.3390/agronomy12030750.
- [15] **San Emeterio de la Parte M, Lana Serrano S, Muriel Elduayen M, Martínez-Ortega JF.** Spatio-temporal semantic data model for precision agriculture IoT networks. *Agriculture.* 2023; 13(2): 360. DOI: 10.3390/agriculture13020360.
- [16] **Senapaty MK, Ray A, Padhy N.** IoT-enabled soil nutrient analysis and crop recommendation model for precision agriculture. *Computers.* 2023; 12(3): 61. DOI: 10.3390/computers12030061.
- [17] **Wilson SI, Goonetillake JS, Ginige A, Walisadeera AI.** Towards a usable ontology: the identification of quality characteristics for an ontology-driven decision support system. *IEEE Access.* 2022; 10: 12889–12912. DOI: 10.1109/ACCESS.2022.3146331.
- [18] **Filippov A, Gilmetdinova E, Romanov A.** Development of an Algorithm for Path Planning for Highly Autonomous Agricultural Vehicles. *2025 International Russian Automation Conference (RusAutoCon).* *IEEE,* 2025: 431–436. DOI: 10.1109/RusAutoCon65989.2025.11177433.
- [19] **Filippov A, Romanov A.** Construction of a Fuzzy Logical Inference System Based on Semantic Web Technologies. *2024 International Russian Automation Conference (RusAutoCon).* *IEEE,* 2024: 768–773. DOI: 10.1109/RusAutoCon61949.2024.10694476.
- [20] The description logic handbook: Theory, implementation and applications / F. Baader (ed.). UK, Cambridge: Cambridge university press, 2003. 622 p.
- [21] **Yagodin BA, Zhukov YP, Kobzarenko VI.** Agrochemistry [In Russian]. 5th ed. Saint Petersburg: Lan; 2025. 584 p.
- [22] **Romanov AA, Filippov AA, Yarushkina NG.** An approach to generating fuzzy rules for a fuzzy controller based on the decision tree interpretation. *Axioms.* 2025; 14(3): 196. DOI: 10.3390/axioms14030196.

## About the authors

**Anton Alekseevich Romanov** (b. 1986) graduated from the UISTU (2009), Candidate of Technical Sciences (2013). Head of the Department of information systems, UISTU, Member of the Russian Association of Artificial Intelligence. He is the author and a co-author of about 120 scientific articles and abstracts in the field of Data and Process Analysis. Author ID (RSCI): 684949; Author ID (Scopus): 55903279200. [romanov73@gmail.com](mailto:romanov73@gmail.com).

**Aleksey Aleksandrovich Filippov** (b. 1987) graduated from the UISTU (2009), Candidate of Technical Sciences (2013). Associate Professor at the Department of information systems, UISTU, Member of the Russian Association of Artificial Intelligence. He is a co-author of about 120 scientific articles and abstracts in the field of Knowledge Engineering and Data Analysis. Author ID (RSCI): 708454; Author ID (Scopus): 57191472723. [al.al.filippov@gmail.com](mailto:al.al.filippov@gmail.com) ✉.

Received November 24, 2025. Revised May 14, 2026. Accepted May 18, 2026.