



*А.Н. Швецов, Д.С. Дианов*  
Вологодский государственный университет

*С.В. Дианов*  
Вологодский научный центр Российской академии наук

## РАЗРАБОТКА АГЕНТ-ОРИЕНТИРОВАННОЙ МОДЕЛИ ЛЕСНОЙ ЭКОСИСТЕМЫ\*

В статье описана разработка агент-ориентированной модели лесной экосистемы, предназначенной для прогнозирования динамики роста объёма древесной массы. Отличительной особенностью представленной модели является использование аппарата нечёткого вывода для реализации поведения агентов.

Агент-ориентированное моделирование, экологическая система, нечёткий вывод.

При планировании развития лесопромышленного комплекса, необходимо правильно прогнозировать эффективность тех или иных стратегий, в том числе связанных с обеспеченностью сырьевой базой. Лес относится к возобновляемым ресурсам. Понимание динамики прироста полезной древесной массы на определенной территории позволит выстраивать грамотную политику по развитию системы лесопромышленных предприятий региона.

На рост деревьев оказывает влияние множество различных природных и климатических факторов. Комплексная оценка результата их влияния является сложной задачей. Для ее решения требуются адекватные модели. В этой связи при построении модели лесной экосистемы достаточно перспективным представляется использование агент-ориентированного подхода. Его основной принцип заключается в одновременном выполнении в некоторой среде множества взаимодействующих автономных программных сущностей – агентов. Таким образом, результаты работы модели формируются из совокупности взаимодействий агентов друг с другом и с окружающей средой.

Автономность агентов значительно упрощает процесс масштабирования модели, обеспечивая возможность внедрения в нее новых компонентов без необходимости изменения общей архитектуры. Также стоит учесть, что каждый агент является элементом, моделирующим тот или иной простой аспект сложной системы. Благодаря этому разработка общей модели сводится к разработке множества более простых независимых модулей.

При разработке агент-ориентированных моделей определяющую роль играет этап концептуализации, на котором определяются агенты, модели их поведения, компоненты среды и их свойства. В рамках решаемой проблемы необходимо создать модель экосистемы, в которой будут учтены все значимые для исследуемого параметра компоненты. В связи с этим были сформулированы следующие основные требования к модели [1]:

- модель состоит из элементов, имеющих различные наборы свойств с заданными начальными значениями;
- между элементами модели организованы связи в соответствии с существующими взаимодействиями компонентов моделируемой системы;
- модель обеспечивает изменение определенных свойств элементов, под влиянием связанных элементов, внешних регулирующих воздействий, либо изменения коррелирующих параметров в ходе процесса моделирования;
- существует возможность контроля периода моделирования.

Под экосистемой принято понимать совокупность организмов, живущих совместно в некоей среде обитания и взаимодействующих друг с другом. Одним из основных элементов экосистемы является биотоп. Биотоп – это участок с однородными экологическими условиями, который занимает биоценоз, представленный совокупностью неживых компонентов, однородное по абиотическим факторам среды пространство. Биотоп непосредственным образом влияет на развитие связанного с ним биоценоза, в том числе на развитие древостоя. Каждая экосистема может содержать множество биотопов [2]:

$$SO = \langle \Delta^{SO}, \{bt\} \rangle,$$

где  $\Delta^{SO}$  – ареал среды обитания,  $\{bt\}$  – множество биотопов среды обитания.

Биотоп имеет свой ареал в рамках ареала среды обитания и состоит из множества различных взаимосвязанных компонентов:

$$bt = \langle Nm^{bt}, \Delta^{bt}, \{K^{bt}\} \rangle,$$

где  $Nm^{bt}$  – имя биотопа,  $\Delta^{bt}$  – ареал биотопа,  $\{K^{bt}\}$  – множество компонентов биотопа.

Каждый биотоп может содержать множество компонентов, каждый из которых представляется системой следующего вида:

$$\tau^{bt} = \langle \{A\}, M \rangle,$$

где  $\{A\}$  – множество свойств компонента,  $M$  – модель развития компонента.

\* Работа поддержана грантами РФФИ № №17-06-00514 А, 19-01-00103 А и 18-47-350001 р-а

Любое свойство компонента определяется как:

$$A = \langle NA, DA \rangle,$$

где  $NA$  – имя свойства,  $DA$  – домен значений свойства.

Модель развития компонента определяет изменение значений его свойств во времени и зависит от определенной совокупности значений свойств компонентов биотопа:

$$M = \langle \{fR(\{A\})\}, \Delta t \rangle,$$

где  $fR$  – функция изменения значения свойства компонента,  $\Delta t$  – интервал времени изменения значений свойств компонентов биотопа.

Каждый компонент биотопа принадлежит конкретному типу, что определяет набор его свойств и модель развития:

$$K^{bt} = \langle \tau^{bt}, \mu A(t) \rangle,$$

где  $\mu A(t)$  – матрица значений свойств компонента биотопа в момент времени  $t$ :

$$\mu A(t) = \{NA:VA\},$$

где  $VA$  – значение свойства компонента.

Представленная модель может быть реализована с использованием одного или множества программных агентов, основной целью которых является слежение за состоянием свойств компонентов биотопа и изменением их в соответствии с моделями развития.

Связь модели биотопа с моделями элементов других систем в общей модели экосистемы обеспечивается за счет того, что последние могут использовать текущие свойства моделей компонентов биотопа для построения моделей собственного развития.

Согласно агент-ориентированному подходу, элементы модели представляются в виде отдельных агентов, каждый из которых характеризуется собственной моделью поведения. В целях апробации предложенных подходов была создана упрощенная модель экологической системы лесного участка, содержащая три типа агентов: агент почвы, агент микроклимата и агент сосны.

Для программной реализации модели была выбрана среда моделирования AnyLogic [3], в которой реализована возможность создавать агент-ориентированные модели. Единицей модельного времени выбран год. В модели использованы усредненные за год значения параметров, имеющих сезонные колебания.

В соответствии с концепцией агент-ориентированного моделирования в среде AnyLogic внешняя среда модели определена агентом (main). Параметрами внешней среды являются:

- освещённость (light) – выражаемая в люксах величина, в нашем случае характеризует освещённость земной поверхности, не занятой растительностью;

- площадь (square) – величина, выражающая площадь, свободную для произрастания растений. Этот параметр вносит ограничение на максимальное количество древостоя на моделируемом участке леса;

- количество выпадающих осадков (rains).

В соответствии с предложенным подходом в модели определены три агента: агент микроклимата (micro), агент почвы (grnd) и агент сосны (pines).

На рисунке 1 показана общая структура модели в среде AnyLogic.

Для каждого агента, в свою очередь, определен набор свойств, характеризующих его текущее состояние. На рисунке 2 представлен вид созданного агента сосны в интерфейсе среды разработки AnyLogic.

Поведение агентов формируется в соответствии с функциональными зависимостями, существующими между параметрами элементов моделируемой системы. Вследствие того, что число параметров в функциональных зависимостях между элементами экосистемы лесного участка может быть достаточно велико, а их взаимное влияние слабо поддается формализации, описание моделей поведения агентов представляется нетривиальной задачей.

Для её решения авторами использован аппарат теории нечетких множеств, в частности, алгоритм нечёткого ввода Мамдани [4]. Классическая схема алгоритма нечёткого вывода представлена на рисунке 3.

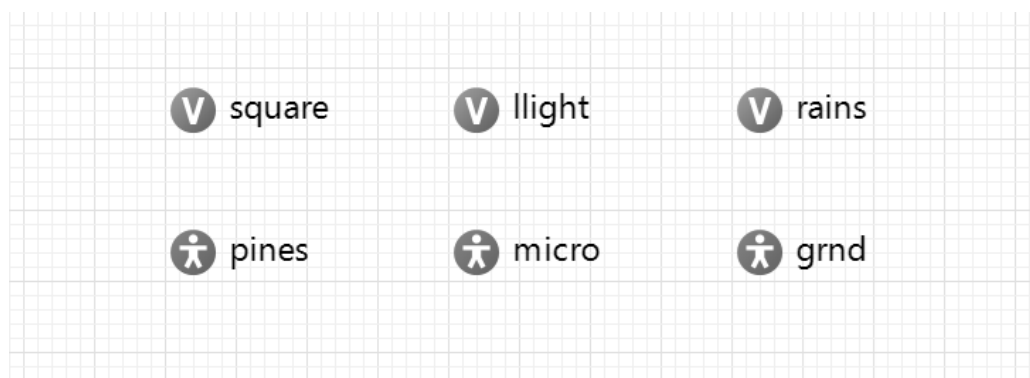


Рис. 1. Общая структура модели

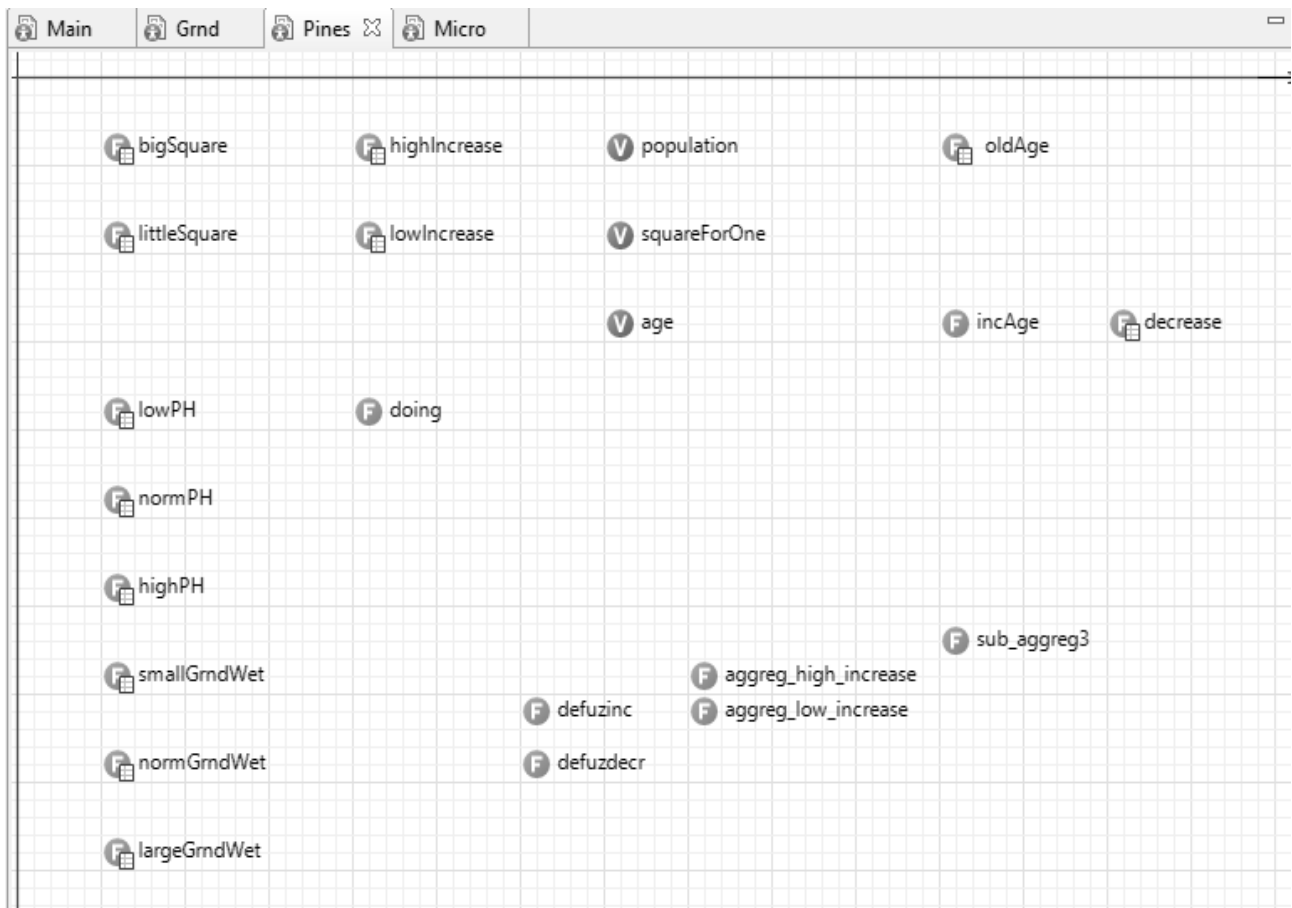


Рис. 2. Вид агента сосны в интерфейсе разработки AnyLogic

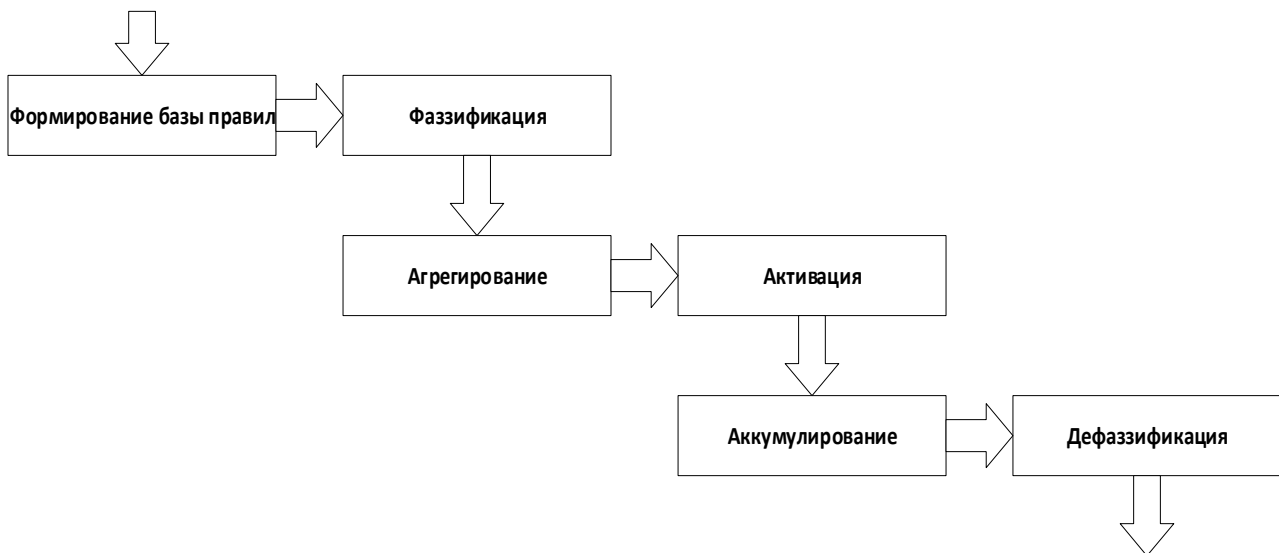


Рис. 3. Схема алгоритма нечёткого вывода

Для реализации моделей поведения агентов модели были сформированы наборы входных и выходных параметров и базы правил нечеткого вывода. Для агента сосны они имеют следующий вид:

- ЕСЛИ площадь большая И влажность средняя И кислотность нормальная, ТО прирост большой;
- ЕСЛИ площадь малая И влажность большая И кислотность кислая, ТО прирост малый;

- ЕСЛИ площадь малая И влажность большая И кислотность щелочная, ТО прирост малый;
- ЕСЛИ площадь малая И влажность малая И кислотность кислая, ТО прирост малый;
- ЕСЛИ площадь малая И влажность малая И кислотность щелочная, ТО прирост малый;
- ЕСЛИ средний возраст старый, ТО отмирание.

Для реализации этапа фазификации были разработаны функции принадлежности для всех нечётких переменных, фигурирующих в базах правил. В среде AnyLogic они реализовывались с использованием механизма табличных функций: в них вручную устанавливались ключевые точки и выбирались различные режимы интерполяции с целью более тонкой настройки нечёткого вывода.

На этапе агрегирования определяется степень истинности условий по каждому правилу системы нечёткого вывода. Так как в базе правил агента используется только операция конъюнкции, то агрегирование производится операцией нахождения минимума значений нечётких переменных каждого высказывания. Для реализации данного алгоритма была создана функция `sub_aggreg3`, которая возвращает минимальное значение из значений трёх параметров, поданных на её вход. Агрегация утверждений про «высокий» и «низкий прирост» осуществляют функциями `aggreg_high_increase` и `aggreg_low_increase`, которые возвращают список значений истинности по всем высказываниям.

Полный цикл нечеткого вывода реализован в функции `doing`, которая определена для всех агентов. Она вызывается на каждом шаге выполнения модели и обеспечивает механизм воздействия агента на среду. По результатам ее работы реализуется следующий алгоритм изменения параметров модели:

- выполняется расчёт прироста популяции сосны;
- вычитается из свободной площади произведение прироста на среднюю площадь, занимаемую одним деревом;
- вычитается из популяции значение отмерших деревьев;

- прибавляется к свободной площади площадь, освобождённая отмершими деревьями;
- вычисляется средний возраст деревьев.

Для проведения тестов, в основном агенте был добавлен элемент «Бегунок», с помощью которого можно манипулировать значением выпадающих осадков.

Проведенные с помощью модели эксперименты показывают, что хотя прирост популяции деревьев и не зависит напрямую от выпадающих осадков, при уменьшении или увеличении количества осадков, по сравнению с нормой, скорость прироста деревьев заметно снижается и прекращается совсем в случае, когда количество выпадающих осадков равняется нулю. Это объясняется тем, что количество выпадающих осадков оказывает влияние на влажность почвы, от чего прирост популяции уже зависит напрямую. Из этого можно сделать вывод, что агенты действительно взаимодействуют друг с другом независимо, оказывая влияние лишь на параметры и интерпретируя их значение.

Изображение проведённого эксперимента представлено на рисунке 4.

В результате проделанной работы, в среде AnyLogic была реализована агент-ориентированная модель лесной экосистемы. Данная модель позволяет получить представление о динамике развития элементов экосистемы, а также оценить степени влияния различных параметров на характеристики системы.

Дальнейшее развитие модели предполагает введение в нее новых агентов и настройку функции принадлежности механизма нечеткого вывода в моделях поведения агентов.

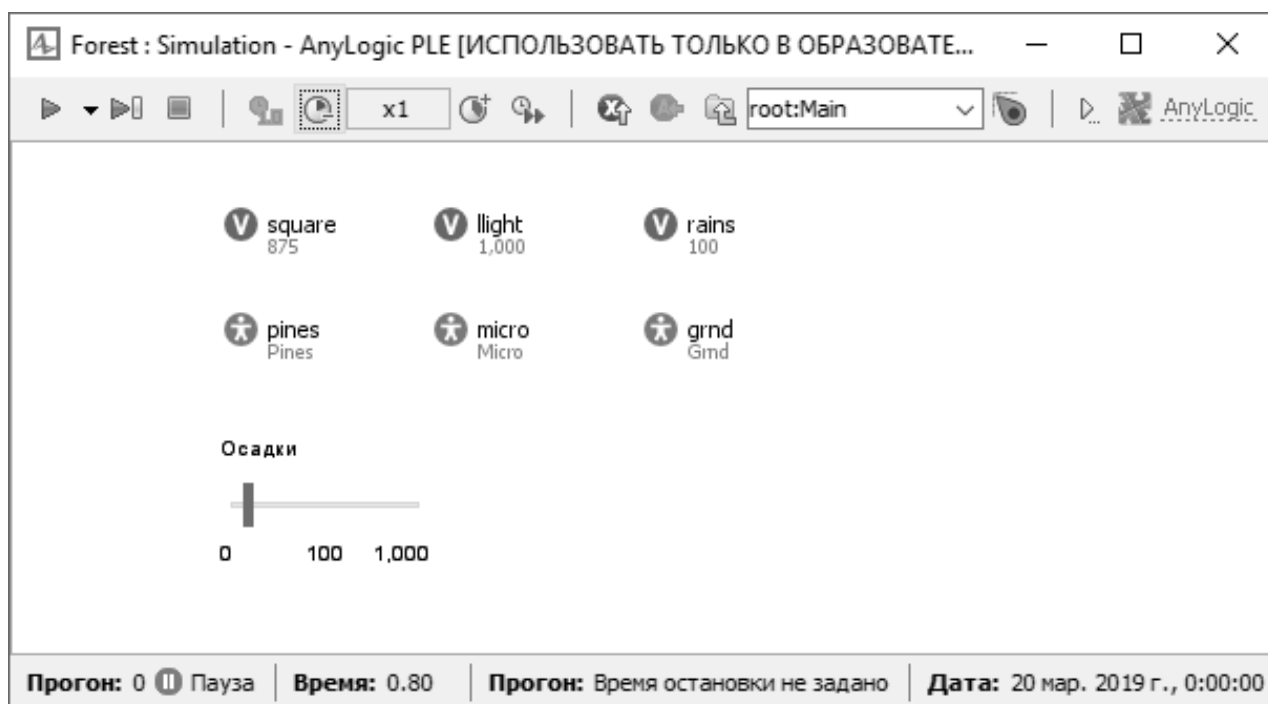


Рис. 4. Вид окна эксперимента

## Литература

1. Дианов, С. В. Архитектура модели перспективного анализа и планирования развития регионального лесного комплекса / С. В. Дианов // Проблемы развития территорий. – 2017. – №5 (91). – С. 148–163.
2. Дианов, С. В. Модель биотопа как элемент агент-ориентированной модели регионального лесного комплекса / С. В. Дианов // Интеллектуально-информационные технологии и интеллектуальный бизнес (ИНФОС-2017) : материалы девятой междуна-
- родной научно-технической конференции. – Вологда : ВоГУ, 2017. – С. 50–53.
3. Каталевский, Д. Ю. Основы имитационного моделирования и системного анализа в управлении : учебное пособие / Д. Ю. Каталевский. – 2-е изд., перераб. и доп. – Москва : Дело РАНХиГС, 2015. – 496 с.
4. Леоненков, А. В. Нечеткое моделирование в среде MATLAB и fuzzyTECH / А. В. Леоненков. – Санкт-Петербург : БХВ-Петербург, 2003. – 736 с.

**A.N. Shvetsov, D.S. Dianov, S.V. Dianov**

### **DEVELOPMENT OF AN AGENT-ORIENTED MODEL OF FOREST ECOSYSTEM**

The paper proposes the development of an agent-based model of a forest ecosystem with the aim of predicting the growth dynamics of wood pulp. To describe the logic of the behavior of agents, it is proposed to use a fuzzy inference apparatus. A practical implementation of the model is presented.

Agent-based modeling, environmental system, fuzzy inference.