

DOI: 10.15838/ptd.2019.1.99.4
УДК 630:330.4 | ББК 65.341+65.050.03

© Ригин В.А., Гулин К.А.

ИНСТРУМЕНТЫ ПОСТРОЕНИЯ ИМИТАЦИОННОЙ МОДЕЛИ РЕГИОНАЛЬНОГО ЛЕСНОГО КОМПЛЕКСА НА ОСНОВЕ ПРИМЕНЕНИЯ АГЕНТ-ОРИЕНТИРОВАННОГО ПОДХОДА¹



РИГИН ВАСИЛИЙ АЛЕКСАНДРОВИЧ
Вологодский научный центр Российской академии наук
Россия, 160014, г. Вологда, ул. Горького, д. 56а
E-mail: riginva@mail.ru



ГУЛИН КОНСТАНТИН АНАТОЛЬЕВИЧ
ООО «Русинтехком»
E-mail: gjil@vscc.ac.ru

В статье рассмотрены вопросы оптимального выбора программных средств для агент-ориентированного моделирования регионального лесного комплекса. Актуальность исследования применения различных программных средств для имитационного моделирования определяется значительным разнообразием данных инструментов, которые отличаются друг от друга используемыми методами, функционалом, а также архитектурой построения моделей. Научная новизна исследования состоит в решении задачи оптимального выбора программных систем для имитационного моделирования регионального лесного комплекса. В статье обозначены основные преимущества и возможности агент-ориентированного подхода к моделированию систем различного уровня сложности. Определены основные параметры моделирования при использовании дан-

Цитата: Ригин В.А., Гулин К.А. Инструменты построения имитационной модели регионального лесного комплекса на основе применения агент-ориентированного подхода // Проблемы развития территории. 2019. № 1 (99). С. 56–70. DOI: 10.15838/ptd.2019.1.99.4

Citation: Rigin V.A., Gulkin K.A. Tools for building a simulation model of the regional timber complex based on the agent-based approach. *Problems of Territory's Development*, 2019, no. 1 (99), pp. 56–70. DOI: 10.15838/ptd.2019.1.99.4

¹ Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ (научный проект № 17-06-00514 А).

ного подхода. Представлены примеры применения агент-ориентированного подхода при моделировании экономических, социальных и технических систем. Выявлены основные параметры агент-ориентированной модели, оказывающие значительное влияние на производительность и ресурсоемкость. Во второй части статьи представлена структура регионального лесного комплекса, выявлены основные его элементы и их характеристики, описаны рабочие процессы и значимые параметры, взаимосвязи, необходимые для построения модели. Основными активными элементами являются государственные учреждения, обеспечивающие рациональное лесопользование, и предприятия лесной промышленности (лесозаготовка, деревообработка и лесохимия, включающая целлюлозно-бумажное производство), потребляющие лесные ресурсы и выпускающие продукцию с целью устойчивого извлечения прибыли. В третьей части статьи выполнен обзор следующих программных систем для имитационного моделирования: SciLab, Open Modelica, FlexSim, NetLogo, Enterprise Dynamics, AnyLogic и Arena. Представленные программные системы являются свободно распространяемыми или имеют полнофункциональную учебную версию. В статье представлено описание и основные характеристики указанных систем моделирования, а также исходя из оценки объекта моделирования (региональный лесной комплекс) определены критерии оптимальности для проведения сравнительного анализа систем моделирования. При анализе выявлены основные особенности систем моделирования по каждому из критериев и сделан вывод о том, что для построения прототипа агент-ориентированной модели регионального лесного комплекса оптимальным программным инструментом является система AnyLogic при условии соответствия размеров модели ограничениям персональной версии системы.

Агент-ориентированное моделирование, региональный лесной комплекс, программное обеспечение для имитационного моделирования.

Введение

Лесные ресурсы являются возобновляемыми и расположены на более чем половине территории Российской Федерации, что отличает их от других природных ресурсов, таких как углеводороды или различные руды, которые, напротив, являются невозобновляемыми и расположены в основном в труднодоступных местах. Несомненно, лесные ресурсы являются одним из ключевых ресурсов Российской Федерации, промышленный потенциал которых не полностью задействован. Для повышения эффективности использования лесных ресурсов необходимо обеспечить устойчивое экономическое развитие лесного комплекса Российской Федерации. Лесной комплекс является сложной экономической системой, где при научно обоснованном совершенствовании процессов управления высокой сложности необходимы проведение анализа принимаемых решений и построение прогнозов развития ситуации на уровне модели, а не на реальной системе, с целью предваритель-

ного выявления возможных управленческих ошибок. Для решения такого рода задач следует применять современные методы имитационного моделирования. Одним из современных методов имитационного моделирования является агент-ориентированное моделирование, результаты которого успешно применяются не только в научных исследованиях, но и в бизнес-системах, и государственном управлении. Данный метод имитационного моделирования предполагает использование значительного количества данных о различных экономических процессах и субъектах, что невозможно реализовать без применения современных программных и вычислительных средств. Поэтому основной целью исследования, результаты которого освещены в данной статье, является проблема выбора оптимального программного инструмента для построения имитационной модели регионального лесного комплекса, так как выбор средств моделирования определяет природа самой исследуемой системы. Для достиже-

ния поставленной цели будут определены методы имитационного моделирования и основные критерии оптимальности для построения модели регионального лесного комплекса, а также проанализированы наиболее распространенные и доступные программные системы имитационного моделирования согласно выбранным критериям. Так как приобретение нескольких коммерческих программных продуктов с высокой стоимостью нецелесообразно для проведения сравнительного исследования различных систем имитационного моделирования, будут рассмотрены только свободно распространяемые программные средства и коммерческие продукты, имеющие полнофункциональную версию ознакомительного либо учебного характера. Исследование основано на применении общенаучных методов познания: анализа и синтеза; системного подхода; методов обобщения и сравнения, классификации и систематизации.

Агент-ориентированное моделирование

В настоящее время в имитационном моделировании сложных социально-экономических и технических систем широкое распространение получили методы агент-ориентированного моделирования (АОМ). Данное направление имитационного моделирования активно развивается и набирает популярность среди зарубежных и российских исследователей, так как позволяет строить достаточно адекватные модели исследуемых систем [1]. Среди российских ученых наибольший вклад в изучение данного метода моделирования внесли сотрудники ЦЭМИ РАН – А.Р. Бахтизин, Е.Д. Сушко., М.Р. Фатахов. Агент-ориентированное моделирование основано на формировании групп агентов, взаимодействующих друг с другом и с внешней средой, имеющих индивидуальное поведение, обладающее свойствами автономности, неоднородности, ограниченной интеллектуальности и расположением в пространстве [2]. Понятия «агент» и «среда» являются важнейшими классами агент-ориентированного моделирования [3]. Эффек-

тивность агент-ориентированного моделирования достигается за счет возможности изменения различных параметров модели (свойства агентов, среды и различных взаимодействий между ними типа «агент-агент» и «агент-среда»), проведения достаточно большого количества симуляций (запусков) модели с последующей статистической обработкой результатов эксперимента, это позволяет воспроизводить с использованием АОМ различные сценарии работы социально-экономических или технических систем и при этом оценивать реакцию системы на возможные управленческие воздействия [4].

Для построения модели с использованием инструментария АОМ необходимо определить следующие наиболее важные параметры:

- типы агентов, которые будут задействованы в системе;
- основные характеристики или свойства агентов, которые являются существенными для моделируемого процесса;
- методы или функции агентов для взаимодействия друг с другом («агент-агент») или с внешней средой («агент-среда»);
- количество агентов, используемых для проведения симуляций с необходимой точностью оценки результатов моделируемого процесса;
- способы калибровки построенной модели, данные, которые будут при этом использованы;
- период симуляции, в зависимости от модели может составлять краткосрочный период (до 1 года) или долгосрочный (свыше 3 лет).

Методы агент-ориентированного моделирования могут применяться в различных сферах для имитации социальных, экономических, финансовых систем и процессов. Так, например, построены модели демографических процессов трудовой миграции из Китая в Россию [5], процессы естественного движения населения региона (смертность, рождаемость) [6], процессы слияния организаций [7], процессы, возникающие на товарных и финансовых рынках (свободные

однотоварные рынки) [8; 9], процессы аренды сельскохозяйственных угодий [10] и пр. С использованием АОМ построены модели крупных социально-экономических систем, таких как мультиагентная модель России, агент-ориентированная региональная модель «Губернатор», агент-ориентированная межрегиональная межотраслевая модель «затраты-выпуск».

В настоящий момент исследования российских ученых по проблемам построения агент-ориентированных моделей лесного комплекса практически отсутствуют. Между тем спектр зарубежных исследований, посвященных агент-ориентированному моделированию различных подсистем лесного комплекса, достаточно широк. Так, например, разработаны агент-ориентированные модели рынков лесоматериалов [11], процессов самоорганизации при адаптивном управлении лесами [12], рынка древесного топлива Швейцарии [13], системы мероприятий по защите лесов Британской Колумбии от заражения жуками-лубоедами [14], распространения лесных пожаров [15], системы управления пожарной и экологической безопасностью лесов штата Орегон (США) [16; 17].

Инструментарий АОМ применяется для прогнозирования долгосрочного развития экономических систем. При построении такого рода моделей может использоваться междисциплинарный подход на стыке психологии, социологии, экономики, искусственного интеллекта, который позволяет получить более точные оценки, чем с применением существующих математических и вычислительных моделей, базирующихся на равновесии и максимизации предельной полезности деятельности экономических агентов. Исследуемую макроэкономическую систему можно представить в виде совокупности процессов на микроуровне и управляющих воздействий на макроуровне, при этом решения агентов системы различного уровня принимаются с учетом их ограниченной рациональности. В результате при исследовании экономических процессов на микроуровне можно достаточно точно оценить эффективность управляющих воздей-

ствий на макроуровне, например, со стороны органов государственной власти [18].

Агент-ориентированное моделирование является достаточно универсальным и наглядным методом, особенно для прикладных исследований, однако данный подход также очень требователен к вычислительным ресурсам. Можно выделить следующие параметры модели, которые оказывают значительное влияние на производительность и ресурсоемкость:

- количество агентов, используемое в модели;
- алгоритмическая сложность агентов, уровень их интеллектуальности (алгоритмы принятия решения агентами при взаимодействии как на уровне «агент-агент», так и на уровне «агент-среда»);
- объем используемых данных, например, взаимодействие с наборами данных категории BIG DATA (большие данные);
- длительность периода симуляции, возможны периоды в несколько лет, а также могут быть спроектированы модели без ограничений длительности (бесконечные циклы).

Агент-ориентированное моделирование длительных процессов в масштабах страны или планеты с использованием значительного количества интеллектуальных агентов, взаимодействующих с большими наборами данных, требует значительной вычислительной мощности [19]. Для запуска такого рода моделей необходимо использование суперкомпьютеров, что значительно увеличивает затраты на техническую реализацию АО моделей, так как требует изучения исследователями соответствующего специализированного программного обеспечения и теории параллельных вычислений [20].

Лесной комплекс

Исследований в области построения агент-ориентированной модели регионального лесного комплекса с учетом российской специфики практически не проводилось, поэтому перспективы построения подобных моделей не вызывают сомнений. Одной из основных

задач построения агент-ориентированной модели регионального лесного комплекса является определение состава агентов, функциональной и поведенческой составляющей агентов, а также определение взаимосвязей между агентами и средой модели [21]. Поэтому необходимо рассмотреть более подробно объект моделирования, а именно региональный лесной комплекс.

Региональный лесной комплекс можно условно разделить на лесное хозяйство и лесную промышленность, состоящую из следующих отраслей: лесозаготовительная, деревоперерабатывающая и лесохимическая, включающая целлюлозно-бумажное производство. Функции управления лесным комплексом распределены между органами государственной власти различного уровня (федеральные, региональные, муниципальные), государственными учреждениями лесного хозяйства и хозяйствующими субъектами (предприятиями) лесной промышленности.

В качестве сырьевой базы для лесной промышленности выступают лесные ресурсы, размещенные на территориях лесного фонда. Лесные ресурсы являются возобновляемыми природными ресурсами, на их количество и качество влияют климат, типы почв, биосфера, различные природные явления и катаклизмы, а также деятельность человека.

Государство на федеральном уровне влияет на управление лесным комплексом посредством законов, регламентов и нормативов, которые сосредоточены в Лесном кодексе и в связанных с ним нормативно-законодательных актах. Также органы власти на федеральном уровне проводят налоговую политику, денежно-кредитную и инвестиционную политику и осуществляют таможенное регулирование, что также может влиять на функционирование лесного комплекса. Кроме того, федеральные органы государственной власти осуществляют учет лесных ресурсов, данные о которых размещаются в лесном реестре.

Региональные органы государственной власти осуществляют организацию рационального лесопользования, проводят конкурсные процедуры по распределению

лесных ресурсов и заключение договоров аренды, а также через сеть специализированных государственных учреждений (лесхозы, лесничества) осуществляют ведение лесного хозяйства. Лесное хозяйство включает в себя следующие функции:

- лесной надзор (выявление незаконных рубок, контроль мероприятий в рамках договоров аренды и проектов освоения лесных участков);
- защита лесов от вредителей и болезней (выявление проблемных участков, проведение санитарных рубок и пр.);
- охрана лесов от пожаров (проведение противопожарных мероприятий, организация тушения пожаров);
- уход за лесами и лесовосстановление (комплекс мероприятий по осуществлению воспроизводства и улучшения состава и структуры лесных ресурсов, организация работы питомников и лесного семеноводства);
- организация лесной инфраструктуры (строительство лесных дорог, мест отдыха и пр.);
- проведение работ по лесоустройству (государственная инвентаризация лесов, формирование лесного плана).

При проведении лесоустроительных работ активно применяются ГИС-технологии, с помощью систем навигации (Глонасс, GPS) составляются подробные карты, определяются границы участков (выделы, подвыделы), сведения о лесобразующих породах деревьев (ель, сосна, береза, осина и пр.), группы и типы лесов, возрастные категории лесов, вся полученная информация направляется в систему лесного реестра. Современные ГИС-технологии могут быть интегрированы с системами агент-ориентированного моделирования, что позволит получить доступ к пространственным данным, которые могут быть использованы для принятия решений агентами, например, в рамках лесохозяйственной деятельности [22].

Кроме того, региональные органы государственной власти могут оказывать воздействие на экономическую эффективность предприятий лесного комплекса за счет под-

держки инвестиционных проектов, приоритетного распределения ресурсов при проведении конкурсов на аренду лесных участков, а также посредством стимулирующих финансовых механизмов (например, льготное кредитование и пр.).

Предприятия лесозаготовительной отрасли лесной промышленности принимают участие в конкурсных процедурах по распределению лесных участков и заключают договоры аренды, выполняют подготовку проекта освоения лесного участка (самостоятельно или в проектных организациях), выполняют лесохозяйственные работы в рамках арендованных участков и согласованных проектов освоения, такие как уход за лесами и лесовосстановление, проведение противопожарных мероприятий, организация инфраструктуры (лесные дороги, склады, места отдыха), работы по инвентаризации лесов. Кроме того, предприятия осуществляют основную производственную деятельность, которая включает в себя валку леса, первичную обработку (обрезка сучьев, раскряжевка хлыстов и окорение), сортировку, транспортировку и хранение на нижних складах, а также переработку или вывоз отходов. Основной продукцией лесозаготовки является круглый лес, разделенный на сортименты, балансы и дрова. Круглый лес-пиловочник поступает на деревоперерабатывающие предприятия, балансы на целлюлозно-бумажные производства, дрова в системы отопления, отходы направляются в качестве сырья для производства биотоплива и лесохимической промышленности. В северных и умеренных широтах лесозаготовка имеет сезонный характер, так как валка и вывоз леса осуществляется в зимний период (древесина имеет минимальную влажность, качество дорог позволяет осуществить вывоз леса на нижние склады), а лесохозяйственные работы осуществляются в весенне-осенний период. Кроме лесозаготовительной деятельности лесопользователи могут арендовать лесные участки для заготовки пищевых лесных ресурсов и лекарственных растений, строительства сооружений, ведения охотничьего хозяйства,

рекреационной деятельности и разработки месторождений полезных ископаемых.

Деревоперерабатывающие предприятия получают сырье от лесозаготовительных предприятий или на открытом рынке, и осуществляют механическую обработку древесины для производства пиломатериалов (доска, брус и пр., низкая степень переработки) или выполняют производство шпона, фанеры, клееных изделий (брус, щит и пр.) и плитных древесных материалов (ДВП, ДСП, ЛДСП, MDF, OSB). Отходы деревоперерабатывающих предприятий могут быть направлены на производство биотоплива. Продукция предприятий может быть использована в строительстве, мебельном производстве или поставляться в торговые сети, товарные рынки или за рубеж.

Лесохимическая промышленность осуществляет глубокую переработку древесины с использованием химических процессов и реактивов, представлена следующими производствами:

- целлюлозно-бумажное производство (целлюлоза, бумага, картон, более 85% от объемов всей лесохимии);
- гидролизное производство (фурфурол, гидролизный спирт, глюкоза, сорбит, ксилит);
- дубильно-экстрактовое производство (дубильные вещества);
- канифольно-скипидарное производство (канифоль, скипидар);
- пиролизное производство (уксусная, пропионовая и масляная кислоты, метанол, древесная смола, древесный уголь).

Лесохимическая промышленность имеет наибольшую добавленную стоимость продукции и требует значительных затрат на технологическое переоснащение и внедрение новых технологий.

Предприятия лесной промышленности могут представлены как отдельными бизнес-единицами в рамках соответствующей отрасли (лесозаготовка, деревопереработка и лесохимия), так и вертикально-интегрированными холдингами, объединяющими несколько отраслей лесной промышленности.

Кроме того, влияние на работу лесного комплекса оказывают финансовые организации (банки, инвестфонды, лизинговые компании), так как при нехватке оборотных средств предприятия вынуждены использовать заемные средства (кредиты, инвестиции, лизинг). Кадровое обеспечение лесного хозяйства и лесной промышленности осуществляют образовательные организации в рамках действующих образовательных программ по подготовке или переподготовке специалистов. Технологическое обеспечение лесного хозяйства направлено на повышение качества лесопосадочного материала за счет использования результатов селекционных и генетических исследований. Технологическое обеспечение лесной промышленности направлено на разработку оборудования и технологий, обеспечивающих увеличение производительности труда, сокращение производственных издержек и повышение ка-

чества готовой продукции. Технологическое обеспечение могут осуществлять научно-исследовательские организации и машиностроительные предприятия, а также необходимое оборудование и технологии можно приобрести на открытом рынке.

Общая схема лесного комплекса представлена на схеме (рис.).

С точки зрения имитационного моделирования регионального лесного комплекса можно выявить ряд особенностей:

- использование в модели внешних данных о лесном фонде, предприятиях и государственных учреждениях, содержащихся в лесном реестре;
- использование в модели данных ГИС, так как лесные ресурсы и необходимая инфраструктура имеют жесткую пространственную привязку;
- использование в модели языков программирования или моделирования для ре-

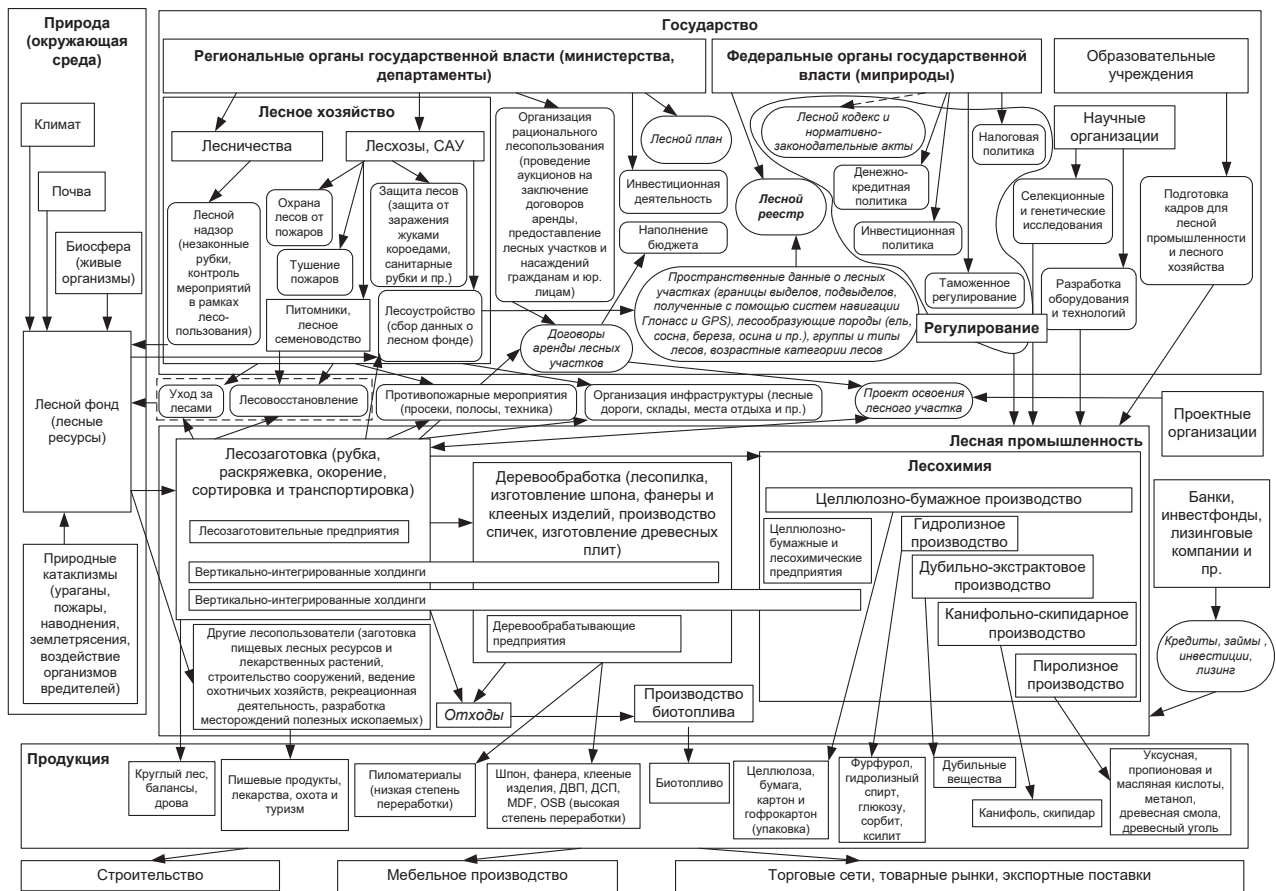


Рис. Общая схема лесного комплекса

Источник: разработано автором.

лизации сложных алгоритмов поведения агентов;

- использование в системе моделирования методов, повышающих степень наглядности, удобства и простоты разработки модели на начальном этапе подготовки модели или представления результатов моделирования.

Программные средства

Для эффективного построения имитационной модели экономических, социальных и технических систем необходимо применение специализированных программных средств – систем моделирования [23].

Рассмотрим программные инструментальные средства имитационного моделирования, свободно распространяемые с открытым исходным кодом, и коммерческие продукты, имеющие полнофункциональные учебные версии:

- система моделирования SciLab;
- система моделирования OpenModelica;
- система моделирования Flexsim;
- система моделирования NetLogo;
- система моделирования Enterprise Dynamics;
- система моделирования AnyLogic;
- система моделирования Arena.

Для выбора оптимального средства разработки агент-ориентированной модели регионального лесного комплекса из представленных программных систем необходимо определить критерии и выполнить соответствующий сравнительный анализ систем моделирования. Рассмотрим обозначенные программные системы имитационного моделирования.

Scilab представляет собой кроссплатформенную программную систему с открытым исходным кодом, обеспечивающую открытое окружение для инженерных, технических и научных расчетов. Система предоставляет мощные средства работы с матрицами, полиномами, позволяет производить численные вычисления и решать задачи линейной алгебры, оптимизацию и симуляцию, а также статистические функции. Scilab был спроектирован как открытая система, пользовате-

ли могут добавлять в него свои типы данных и операции путем перегрузки. Система имеет язык программирования высокого уровня, обеспечивающий доступ к расширенным структурам данных, двумерным и трехмерным графическим функциям, а также содержит подсистему XCOS для решения задач моделирования и симуляции гибридных динамических систем, включая моделирование механических систем, гидравлических контуров и систем управления. Благодаря своей способности взаимодействовать со сторонними технологиями и приложениями Scilab также может выступать в качестве уникальной платформы для объединения кодов, написанных на разных языках программирования, на одном унифицированном языке, что облегчает их распространение, резервное копирование и использование, так что ее в какой-то мере можно рассматривать как систему разработки высокотехнологичных приложений.

OpenModelica является системой моделирования с открытым исходным кодом, реализующей язык моделирования Modelica, система предназначена для решения не только научных, учебных, но и прикладных производственных задач. Язык Modelica, реализованный в системе, представляет собой декларативный, объектно-ориентированный язык моделирования для компонентного моделирования систем высокой сложности, систем, содержащих электронные, механические, энергетические блоки, а также элементы управления. Modelica имеет сходство с объектно-ориентированными языками программирования, такими как Java и C++. Между тем классы Modelica не компилируются, а преобразуются в объектный код, который затем выполняется виртуальным процессором. При этом классы содержат алгоритмические конструкции, сходные с операторами в языках программирования, но значительную часть кода составляют множества уравнений, которые не определяют причинно-следственные связи, а процессор может определять порядок исполнения уравнений, представленных в символьном виде, а также элементы входов и выходов.

Система имитационного моделирования Flexsim позволяет создавать дискретно-событийные (процессные) модели, агент-ориентированные модели и модели системной динамики. При этом система Flexsim поддерживает мощные инструменты 3D визуализации моделей и наборы различных готовых объектов с 3D представлением, которые можно использовать в процессе моделирования. Основным направлением применения системы Flexsim является моделирование производственных процессов и систем массового обслуживания с использованием 3D визуализации для анализа и оптимизации производственных процессов, пропускной способности производственных линий, выявления проблемных мест при выпуске продукции или в системах обслуживания. Разработана отдельная подсистема для моделирования медицинских учреждений Flexsim Healthcare со всеми необходимыми объектами для построения имитационных моделей в данной сфере. Основными элементами системы являются процессы, которые определяются в аналогичных терминах стандартных нотаций бизнес-процессов (BPMN или Workflow) – это элементы потока (действия, события и логические операторы), соединяющие элементы (потоки управления и информации), роли (дорожки, зоны ответственности исполнителей) и артефакты (данные, сообщения и пр.). Также имеются элементы в терминологии систем массового обслуживания, такие как заявки, очереди, исполнители и управляющие процессоры. Между тем учебная версия ограничена количеством элементов, используемых в модели (до 30 шт.), а также сокращено разнообразие различных готовых элементов. Поэтому исходя из данных ограничений систему Flexsim невозможно использовать при моделировании сложных систем с большим количеством элементов.

NetLogo представляет собой систему имитационного моделирования, реализующую дискретно-событийное процессное моделирование и агент-ориентированное моделирование с использованием одноименного языка моделирования NetLogo и функционирующую

на виртуальной машине Java (JVM). Проект является свободно распространяемым программным обеспечением с открытым кодом (Open source), также имеются скомпилированные бинарные версии для операционных систем семейства MS Windows. В среде моделирования NetLogo имеется доступ к специализированным библиотекам элементов моделей, которые можно использовать при моделировании как блоки. В терминологии среды моделирования агенты представляют собой черепашек (turtles), передвигающихся по точкам, которые определяются координатами на целочисленной матрице или решетке, точки и черепашки могут иметь свои уникальные свойства в рамках модели, также существует возможность определения связей между черепашками, функции управления системой (например, генерация или ликвидация черепашек) определяются наблюдателем. Любые элементы модели задаются с помощью написания соответствующего кода в редакторе, визуального способа моделирования не предусмотрено системой, среда существования агентов определяется целочисленной матрицей или решеткой, что также не подходит для решения некоторых задач. Между тем язык моделирования достаточно прост в изучении, результаты моделирования обладают высокой достоверностью, а в силу полного доступа к проекту может быть широко распространен для решения различных задач моделирования, где не требуется расширенный функционал агентов и элементов среды разрабатываемой модели, то есть применим для относительно простых моделей.

Система имитационного моделирования Enterprise Dynamics, как и система Flexsim, позволяет осуществлять моделирование, оптимизацию и контроль производственных процессов в сфере систем массового обслуживания, логистики и в промышленности. С помощью системы Enterprise Dynamics можно визуализировать рабочие процессы на предприятии, определить необходимые ресурсы, затраты времени, а также выполнить оценку устойчивости и безопасности производственных систем. Общую архитектуру Enterprise Dynamics можно предста-

вить в совокупности следующих подсистем: процессор выполнения симуляции моделей (движок), составные объекты модели и пользовательский интерфейс. При моделировании имеется возможность использования специализированного языка 4DScript (3D координаты в пространстве + 1D время -> выполнение команд script), который достаточно простой в изучении и наглядный. Язык 4DScript можно использовать для создания различных поведенческих сценариев, которые происходят в реальности, а также 4DScript поддерживает конструкции и команды, которые описывают перемещение объектов и изменение внутренних свойств в течение модельного времени. Объекты модели в терминологии системы называются атомами. Все атомы обладают характерными свойствами, которые определяются в процессе проектирования и симуляции. Каждый атом способен реагировать на события, которые происходят во внешней среде модели. Система уже содержит значительное количество шаблонов наиболее распространенных объектов реального мира, а также позволяет разработать необходимые объекты самостоятельно. Функционал пользовательского интерфейса может быть полностью изменен независимо от других подсистем, что позволяет пользователю системы получить доступ к необходимой информации и улучшить качество и скорость принятия решений при работе с системой.

Система имитационного моделирования AnyLogic позволяет создавать модели с помощью всех основных подходов, это дискретно-событийное моделирование, агент-ориентированное моделирование и системная динамика. Для моделирования с использованием различных подходов в системе имеются средства визуального проектирования моделей, кроме того в систему встроен компилятор языка Java, что позволяет существенно расширить функционал отдельных компонент модели. С помощью визуального моделирования можно создавать собственные 3D представления и анимацию объектов модели и импортировать элементы и чертежи из CAD-систем, также имеется

возможность использования готовых объектов из различных отраслевых библиотек. Кроме того, в моделях можно использовать пространственные картографические данные, полученные из ГИС-систем. В системе моделирования также предусмотрены интерфейсы ко всем наиболее популярным системам управления базами данных для получения необходимой информации для объектов модели, также имеется возможность использования встроенной базы данных AnyLogic. В полной версии системы имеется возможность создания автономных скомпилированных моделей (приложений), которые можно выполнять за рамками системы моделирования, что позволяет ознакомиться с результатами моделирования других участников. Кроме того, существуют механизмы интеграции системы моделирования с информационными бизнес-системами (ERP, MPR, CRM, BI). Для калибровки разработанных моделей в системе AnyLogic реализовано несколько способов экспериментальной проверки моделей, которые позволяют при использовании случайных параметров определить поведение модели. На текущий момент реализован доступ к возможностям системы моделирования AnyLogic с помощью платформы облачных вычислений AnyLogic Cloud, данный способ позволяет осуществлять моделирование без установки программного обеспечения, а также все вычислительные расчеты производятся на ресурсах облачной платформы, при этом имеется возможность предоставления доступа к разработанной модели другим участникам без необходимости ее сборки и компиляции.

Система имитационного моделирования Arena реализует дискретно-событийный (процессный) подход к построению моделей. Система имеет визуальный редактор для построения моделей и библиотеки необходимых компонент. Визуальная схема преобразуется в язык моделирования SIMAN, реализованный в системе, который в дальнейшем может быть транслирован и запущен на выполнение. Основными типами компонент модели являются источники, стоки, процессы и очереди. Источники пред-

ставляют собой генераторы заявок, транзактов, формирующие входные данные модели. Стоки, напротив, формируют выходной поток данных модели. Процессы обрабатывают входной поток данных, полученных от источников, при этом могут быть использованы очереди с различными алгоритмами работы. С помощью представленного набора инструментов достаточно просто реализовать модели различных систем массового обслуживания и процессного управления. В системе реализована интеграция с программными продуктами Microsoft (Excel, Access и пр.). В системе имеется возможность создания 2D/3D анимации процесса симуляции модели и формирования различных статистических отчетов о результатах проведенных экспериментов. В целом возможности системы позволяют провести имитационное моделирование практически любых процессов на основе дискретно-событийного подхода.

Для проведения сравнительной оценки представленных систем моделирования необходимо определить оптимальные критерии для использования данных систем при моделировании регионального лесного комплекса. Структура и основные характеристики регионального лесного комплекса были представлены во второй части статьи. На основе рассмотренных особенностей регионального лесного комплекса и используемых методов агент-ориентированного моделирования, можно выделить следующие критерии:

- поддерживаемые системой подходы имитационного моделирования (событийно-дискретное, агент-ориентированное);
- возможность визуального моделирования;
- доступ к внешним источникам данных (СУБД) при симуляции модели, так как задействуются значительные объемы данных по работе лесного комплекса;
- поддержка языка моделирования или программирования, реализующего разнообразные алгоритмы поведения агентов;

- возможность доступа и отображения пространственных данных, загружаемых из открытых ГИС (Яндекс.Карты, Google.Maps);
- возможные ограничения для учебных версий.

На основе данных критериев была составлена сравнительная *таблица* по представленным в статье системам имитационного моделирования.

По результатам анализа рассмотренных систем имитационного моделирования можно сделать следующие выводы:

- системы с открытым кодом (свободно распространяемое ПО) значительно уступают по функционалу коммерческим версиям;
- в большинстве систем реализован подход дискретно-событийного процессного моделирования, только в системе AnyLogic реализованы все основные подходы имитационного моделирования;
- учебные версии коммерческих систем не ограничены по функционалу и времени использования, но ограничены по размеру модели, некоторые системы ограничены весьма жестко до 30 элементов в системе (FlexSim, Enterprise Dynamics), у остальных ограничения составляют более 100 элементов (AnyLogic, Arena);
- возможностью доступа к внешним данным (СУБД) обладают практически все коммерческие системы в отличие от открытых систем;
- визуальное моделирование реализовано в основном в коммерческих продуктах, а в открытых системах либо отсутствует, либо является очень примитивным;
- работу с ГИС-данными поддерживает только система AnyLogic.

Таким образом, для построения агент-ориентированной модели регионального лесного комплекса оптимальным программным инструментом является система AnyLogic. Дополнительным преимуществом данной системы является возможность использования учебной персональной версии для создания прототипов отдельных подсистем лесного комплекса, соответствующих ограничениям учебной версии системы.

Таблица. Сравнительный анализ программных средств имитационного моделирования

Система имитационного моделирования	Критерий					
	Поддерживаемые системой подходы имитационного моделирования	Визуальное моделирование	Доступ к внешним источникам данных (СУБД)	Поддержка языка моделирования или программирования	Доступ к ГИС-данным	Ограничения учебной версии
SciLab	Моделирование динамических систем	Нет	Нет	Только для описания объектов модели	Нет	Открытый код
Open Modelica	Моделирование динамических систем и процессов	2D	Нет	В рамках языка моделирования Modelica	Нет	Открытый код
FlexSim	Дискретно-событийное и агент-ориентированное моделирование	2D и 3D	Нет	C++	Нет	Ограничено количество элементов модели не более 30
NetLogo	Дискретно-событийное и агент-ориентированное моделирование	Нет	Имеется	NetLogo, только для описания модели	Нет	Открытый код
Enterprise Dynamics	Дискретно-событийное и агент-ориентированное моделирование	2D и 3D	Нет	4DScript	Нет	Ограничено количество элементов модели не более 30
AnyLogic	Моделирование динамических систем, дискретно-событийное и агент-ориентированное моделирование, системная динамика	2D и 3D	Нет	Java	Имеется	Типов агентов в модели до 10, вложенных агентов в одном типе агента до 200, динамически создаваемых агентов до 50000
Arena	Дискретно-событийное и агент-ориентированное моделирование	2D и 3D	MS DAO (MS Access, MS SQL Server)	SIMAN	Нет	Ограничено количество элементов модели не более 100

Источник: составлено автором.

При дальнейшем развитии исследования использование данных учебных прототипов значительно ускорит разработку обобщенной модели регионального лесного комплекса, где уже будет использована полная версия системы. Между тем следует отметить, что программные средства имитационного моделирования, безусловно, ускорят разработку прототипа модели, но при увеличении масштаба модели представленные программные системы не будут применимы, так как это потребует использования высокопроизводительной вычислительной инфраструктуры и совместимых средств программной разработки, которые, как правило, ограничены различными фреймворками

на основе широко распространенных языков программирования Java, C++ и пр., а для этого разработчикам модели необходимы знания в области программной инженерии, языков программирования и различных библиотек, фреймворков и интерфейсов.

Заключение

Современный уровень развития вычислительных систем и программных технологий позволяет решать практические задачи имитационного моделирования различных экономических и технических систем. Агент-ориентированное моделирование является одним из оптимальных инструментов имитационного моделирования сложных

систем, содержащих различные неявные взаимосвязи между компонентами модели. Одной из такого рода сложных экономических систем является региональный лесной комплекс, представляющий систему многоуровневого взаимодействия между государственными учреждениями, направленными на организацию рационального лесопользования (включающего воспроизводство лесных ресурсов и развитие лесной промышленности региона), и производственными предприятиями лесной промышленности, использующими лесные ресурсы для выпуска продукции и устойчивого извлечения прибыли. Исходя из выбранного способа и объекта моделирования были определены несколько критериев для осуществления сравнительной оценки программных систем

моделирования. В результате проведенного сравнительного анализа удалось выяснить, что оптимальным средством моделирования является система AnyLogic при соответствии размеров модели ограничениям учебной версии. С практической точки зрения, результаты данного исследования будут использованы при реализации прототипа агент-ориентированной модели лесовосстановления как одной из подсистем лесного комплекса, представленной в работе К.А. Гулина, С.В. Дианова и М.Б. Антонова [24]. Полученный опыт построения прототипа модели одной из подсистем лесного комплекса в рамках дальнейшего развития исследования может быть учтен при реализации обобщенной агент-ориентированной модели регионального лесного комплекса.

ЛИТЕРАТУРА

1. Макаров В.Л., Бахтизин А.Р. Новый инструментарий в общественных науках – агент-ориентированные модели: общее описание и конкретные примеры // Экономика и управление. 2009. № 12. С. 13–25.
2. Макаров В.Л., Бахтизин А.Р., Сушко Е.Д. Агент-ориентированные модели как инструмент апробации управленческих решений // Управленческое консультирование. 2016. № 12. С. 16–25.
3. Макаров В.Л., Бахтизин А.Р. Социальное моделирование – новый компьютерный прорыв (агент-ориентированные модели). М.: Экономика, 2013. 296 с.
4. Чекмарева Е.А. Новое в методологии исследования социального пространства, или Что такое агент-ориентированное моделирование? // Социальное пространство. 2016. № 4. URL: <http://socialarea-journal.ru/article/2016>
5. Агент-ориентированный подход при моделировании трудовой миграции из Китая в Россию / В.Л. Макаров [и др.] // Экономика региона. 2017. № 2. С. 331–341. DOI:10.17059/2017-2-1
6. Макаров В.Л., Бахтизин А.Р., Сушко Е.Д. Имитация особенностей репродуктивного поведения населения в агент-ориентированной модели региона // Экономика региона. 2015. № 3. С. 312–322. DOI:10.17059/2015-3-25
7. Денисова С.В., Бахтизин А.Р. Моделирование процесса слияний организаций с помощью агент-ориентированной модели // Проблемный анализ и государственно-управленческое проектирование. 2011. № 2. С. 60.
8. Рашидова Е.А. Агент-ориентированное моделирование оптового рынка электроэнергии России // Мир экономики и управления. 2017. № 1. С. 70–85.
9. Вороновицкий М.М. Агент-ориентированная модель замкнутого однотоварного рынка // Экономика и математические методы. 2014. № 2. С. 58–72.
10. Сохова З.Б., Редько В.Г. Агент-ориентированная модель рынка аренды сельскохозяйственных угодий в регионе // XVIII Международная научно-техническая конференция «Нейроинформатика-2016»: сб. научн. тр.: в 3-х ч. Ч. 1. М.: НИЯУ МИФИ, 2016. С. 204–213.

11. Troitzsch K., Klaus G. *Agentenbasierte Modellierung von Märkten*. Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen (SZF), 2012, vol. 163/10, pp. 408–416. Available at: <http://szf-jfs.org/doi/pdf/10.3188/szf.2012.0408>. DOI: 10.3188/szf.2012.0408
12. Gebetstroither E., Kaufmann A., Gigler U., Resetarits A. *Agent-based modelling of self-organization processes to support adaptive forest management*. Contributions to Economics, 2006, part 4, pp. 153–172. Available at: https://link.springer.com/chapter/10.1007%2F3-7908-1721-X_8
13. Kostadinov F., Steubing B. *An agent-based model of an energy wood market in a Swiss region*. Published in: ESSA (European Social Simulation Association) Conference, the 7th, from 19 to 23 September 2011 in Montpellier (Agropolis International). Available at: http://www.issw.ch/fe/waldressourcen/produktionssysteme/publikationen/ESSA2011_FabianKostadinov_v2.pdf
14. Pérez L., Dragicevic S. *Exploring Forest Management Practices Using an Agent-Based Model of Forest Insect Infestations*. Published in: International Congress on Environmental Modelling and Software. Available at: <http://scholarsarchive.byu.edu/iemssconference/2010/all/364>
15. Guangjun Zhang, Yaodong Li. *Agent-based modeling and simulation for open complex systems*. Published in: 2010 2nd International Asia Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics (CAR 2010). Available at: <http://ieeexplore.ieee.org/document/5456783>. DOI: 10.1109/CAR.2010.5456783
16. Spies T.A. White E., Ager A., Kline J.D., Bolte J.P., Platt E.K., Olsen K.A., Pabst R.J., Barros A.M.G., Bailey J.D., Charnley S., Morzillo A.T., Koch J., Steen-Adams M.M., Singleton P.H., Sulzman J., Schwartz C., Csut B. *Using an agent-based model to examine forest management outcomes in a fire-prone landscape in Oregon, USA*. Ecology and Society, 2017, vol. 1. Available at: <https://www.ecologyandsociety.org/vol22/iss1/art25>. DOI: 10.5751/ES-08841-220125
17. Charnley S., Spies T.A., Barros A.M.G., White E.M., Olsen K.A. *Diversity in forest management to reduce wildfire losses: implications for resilience*. Ecology and Society, 2017, vol. 1. Available at: <https://www.ecologyandsociety.org/vol22/iss1/art22>. DOI: 10.5751/ES-08753-220122
18. Машкова А.Л. Прогнозирование долгосрочного развития макроэкономических систем на базе агент-ориентированных моделей // Государственное управление. 2016. № 57. С. 49–68.
19. Суперкомпьютерные технологии в общественных науках: агент-ориентированные демографические модели / В.Л. Макаров [и др.] // Вестн. Рос. акад. наук. 2016. № 5. С. 412–421.
20. Агент-ориентированные модели: мировой опыт и технические возможности реализации на суперкомпьютерах / В.Л. Макаров [и др.] // Вестн. Рос. акад. наук. 2016. № 3. С. 252–262.
21. Гулин К.А., Антонов М.Б. Теоретические аспекты агент-ориентированного моделирования развития лесного комплекса // Экономические и социальные перемены: факты, тенденции, прогноз. 2017. № 6. С. 59–74. DOI: 10.15838/esc.2017.6.54.4
22. Гулин К.А., Ригин В.А. Проблемы применения геоинформационных технологий в агент-ориентированном моделировании регионального лесного комплекса // Социальное пространство. 2017. № 5. URL: <http://socialarea-journal.ru/article/2437>
23. Алексеев Е.Р. Использование свободных программ в научных исследованиях // Прикладная информатика. 2009. № 6. С. 61.
24. Гулин К.А., Дианов С.В., Антонов М.Б. Агент-ориентированный подход к реализации модели лесовосстановления // Проблемы развития территории. 2018. № 1. С. 83–97. DOI: 10.15838/ptd/2018.2.93.6

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Ригин Василий Александрович – и. о. заведующего лабораторией интеллектуальных и программно-информационных систем. Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Вологодский научный центр Российской академии наук». Россия, 160014, г. Вологда, ул. Горького, д. 56а. E-mail: riginva@mail.ru. Тел.: +7(8172) 59-78-44.

Гулин Константин Анатольевич – доктор экономических наук, доцент, директор. ООО «Русинтехком». E-mail: gil@vscc.ac.ru.

Rigin V.A., Gulin K.A.

TOOLS FOR BUILDING A SIMULATION MODEL OF THE REGIONAL TIMBER COMPLEX BASED ON THE AGENT-BASED APPROACH

The article deals with the optimal choice of software for agent-based modeling of the regional timber complex. The relevance of studying the use of various software simulation tools is determined by a significant variety of these tools, which differ from each other in methods, functions, as well as the architecture of model construction. The research novelty consists in solving the problem of optimal choice of software systems for simulating regional timber complex. The article outlines the main advantages and opportunities of the agent-based approach to modeling systems of different levels of complexity. We determine the main modeling parameters using this approach. We also present examples of applying the agent-based approach in modeling economic, social, and technical systems. The main parameters of the agent-based model that have a significant impact on performance and resource intensity are identified. The second part of the article presents the structure of the regional timber complex, identifies its main elements and their characteristics, describes the working processes and significant parameters, and the relationship required to build the model. The main active elements are public institutions for sustainable forest management and forest industry enterprises (logging, wood processing and wood chemistry, including pulp and paper production) consuming forest resources and producing products for sustainable profit. The third part of the article provides an overview of the following software systems for simulation: SciLab, Open Modelica, FlexSim, NetLogo, Enterprise Dynamics, AnyLogic, and Arena. The presented software systems are freely distributed or have a fully functional training version. The article presents a description and the main characteristics of these modeling systems and determines the optimality criteria for comparative analysis of modeling systems based on the evaluation of the modeling object (regional timber complex). The analysis revealed the main features of modeling systems for each of the criteria. It is concluded that the optimal software tool for building a prototype agent-based model of the regional timber complex is AnyLogic system, provided that the model size corresponds to the limitations of the personal version of the system.

Agent-based modeling, regional timber complex, simulation software.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Rigin Vasilii Aleksandrovich – Deputy Head of Laboratory for Intellectual and Software-Information Systems. Federal State Budgetary Institution of Science “Vologda Research Center of the Russian Academy of Sciences”. 56A, Gorky Street, Vologda, 160014, Russian Federation. E-mail: riginva@mail.ru. Phone: +7(8172) 59-78-44.

Gulin Konstantin Anatol'evich – Doctor of Economics, Associate Professor, Director. ООО “Rusintekhhom». E-mail: gil@vscc.ac.ru.