

DOI: 10.15838/esc.2017.6.54.4

УДК 630:330.4, ББК 65.341+65.050.03

© Гулин К.А., Антонов М.Б.

Теоретические аспекты агент-ориентированного моделирования развития лесного комплекса*



**Константин Анатольевич
ГУЛИН**

Вологодский научный центр РАН
Вологда, Российская Федерация, 160014, ул. Горького, д. 56а
E-mail: gil@vscc.ac.ru



**Михаил Борисович
АНТОНОВ**

ООО «ЛанЭкс»
Вологда, Российская Федерация, 160012, Советский пр., 62–12
E-mail: mbantonov@mail.ru

Аннотация. Одним из источников обеспечения устойчивого экономического роста в современной России может выступать повышение эффективности использования лесных ресурсов. Лесной комплекс представляет собой сложную открытую систему, в которой проявляются тесные взаимосвязи между элементами из различных предметных областей: экологической, социальной, экономической, культурной, образовательной, государственного управления. Комплексное решение задач развития лесного комплекса затруднительно без создания научно обоснованной системы поддержки принятия управленческих решений. Целью статьи являлось изучение научных подходов к построению АОМ применительно к лесному сектору для определения об-

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

Для цитирования: Гулин, К.А. Теоретические аспекты агент-ориентированного моделирования развития лесного комплекса / К.А. Гулин, М.Б. Антонов // Экономические и социальные перемены: факты, тенденции, прогноз. – 2017. – Т. 10. – № 6. – С. 59–74. DOI: 10.15838/esc/2017.6.54.4

For citation: Gulin K.A., Antonov M.B. Theoretical aspects of agent-based modeling in the development of the forest complex. *Economic and Social Changes: Facts, Trends, Forecast*, 2017, vol. 10, no. 6, pp. 59–74. DOI: 10.15838/esc/2017.6.54.4

сих методик формирования состава агентов и созданию среды их функционирования. В работе проведен анализ существующих на сегодняшний день попыток структурной формализации предметной области функционирования лесного комплекса, а также характерных особенностей подобных систем. Приводится общая характеристика проблем, связанных с управлением лесным комплексом в России (на федеральном и региональном уровнях). Дается оценка лесного комплекса как сложного объекта исследования. Представлен краткий обзор исследований зарубежных и российских учёных, посвященных как общим методологическим вопросам моделирования лесного комплекса, так и конкретным моделям, реализованным на базе агент-ориентированного подхода: модели рынка древесины Швейцарии, модели защиты лесных массивов Британской Колумбии (Канада) от заражения насекомыми, моделям прогнозирования и борьбы с лесными пожарами, укрупненной архитектуры агент-ориентированной модели регионального лесного комплекса. Рассмотренный опыт применения АОМ для моделирования процессов использования, охраны, защиты, воспроизводства лесов, лесопереработки и лесопользования показывает высокую перспективность данного направления. Использование агент-ориентированного подхода в моделировании регионального лесного комплекса позволяет решить вопрос сложности и масштабируемости модели. Возможности построения многоуровневых и вложенных агентов, индивидуальность агентов как нельзя лучше подходят для моделирования таких сложных систем. При этом необходимо отметить, что до настоящего времени исследований по общей проблематике построения комплексных агент-ориентированных моделей лесного комплекса не проводилось. Полученные результаты позволяют оценить перспективность использования агент-ориентированного подхода для построения моделей регионального лесного комплекса, использовать имеющийся опыт, формулировать направления развития дальнейших исследований.

Ключевые слова: агент-ориентированное моделирование, лесной комплекс, системы поддержки принятия решения.

Введение

Лесной комплекс Российской Федерации занимает важное место в экономике страны. Леса России – один из важнейших возобновляемых природных ресурсов. Они составляют более четверти мировых запасов древесной биомассы и выполняют важнейшие средообразующие и средозащитные функции.

Лесной комплекс представляет собой сложную систему, насчитывающую большое количество различных взаимодействующих субъектов, начиная с органов государственной власти, лесозаготовительных и лесоперерабатывающих предприятий и заканчивая населением, использующим лесные ресурсы для собственных нужд.

Для лесного комплекса характерны географическая разобщенность и удаленность предприятий (лесопользователей), разрозненность и различная степень доступности лесных ресурсов, а также рынков сбыта. Лесопереработка и лесозаготовки носят ярко выраженный сезонный характер. Значительное влияние оказывают климатические колебания.

Очевидно, что комплексное решение задачи развития регионального лесного комплекса затруднительно без создания научно обоснованной системы поддержки принятия управленческих решений. Одной из перспективных сфер научных изысканий в данном направлении может быть разработка, апробация и применение имитационных моделей процессов использования, охраны, защиты, воспроизводства лесов, лесопереработки и лесопользования.

Общие подходы к моделированию лесного комплекса как сложной динамической системы

На сегодняшний день существует большое количество подходов к структурной формализации предметной области функционирования лесного комплекса. Данной теме достаточно серьезное внимание уделено в работах отечественных ученых, таких как Т.Н. Иванова, Н.Е. Антонова, А.С. Шейнгауз, А.А. Киселева.

В работе Т.Н. Ивановой [7] лесопромышленный комплекс (ЛПК) определяется как система предприятий лесной промышленности и связанных с ними части государственного ап-

парата, науки и предприятий других отраслей промышленности, обеспечивающих его функционирование. В соответствии с определением выделяются следующие элементы:

1) отдельные предприятия-производители лесопродукции или их объединения, связанные между собой информационными, материальными и энергетическими потоками;

2) обеспечивающие предприятия, которые предоставляют товары и услуги, жизненно важные для функционирования ЛПК (оборудование, энергия, транспортные услуги и т.п.);

3) управляющие органы, осуществляющие регулирование развития ЛПК, формирующие его инвестиционный и предпринимательский климат.

При этом в качестве экономических интересов для управляющих органов определены получение налоговых доходов, а для бизнес-общества, лесозаготовительного, лесоперерабатывающего и лесоперерабатывающего секторов – привлечение инвестиций в ЛПК, обеспечение расширенного воспроизводства и получение прибыли от реализации лесопродукции.

В работе Н.Е. Антоновой [1] предложена вербальная модель лесного комплекса региона как природно-экономической системы, базирующаяся на разработанной А.С. Шейнгаузом функциональной модели лесопользования и классификации лесных функций на классы: социальные, сырьевые, хозяйственно-экологические, ландшафто-стабилизирующие.

Базовой подсистемой предлагаемой модели является лес, который представляется как совокупность лесной среды и лесных ресурсов. Основным принципом формирования архитектуры системы выступает разделение ее на три блока по функциональному принципу, связанному с использованием лесом. Выделено три типа пользования: социальное, экологическое и сырьевое. Социальное и экологическое пользование отнесены к сфере общественного потребления, а сырьевое – к сфере частного потребления. Частное потребление формирует лесопромышленный комплекс, состоящий из трех последовательных переделов лесного сырья: лесозаготовительное производство, физическое преобразование сырья и химическое (термохимическое) преобразование сырья. Для каждого блока определяются субъекты пользования. К таким субъектам автор относит госу-

дарство в лице федеральных и региональных органов власти, органы местного самоуправления, лесной бизнес, население, общественные организации. Особо выделяются субъекты, относящиеся к лесному бизнесу. Их обозначают как экономических агентов – лесопользователей.

В работах А.А. Киселевой [8, 9] в структуре существующих региональных лесопромышленных комплексов выделяются следующие группы организаций:

1) предприятия различных этапов технологической цепочки производства и переработки лесных ресурсов, в состав которой входят лесоводческие, лесозаготовительные, лесопильные, деревообрабатывающие, целлюлозно-бумажные, лесохимические производства;

2) организации производственной, социальной, институциональной и рыночной инфраструктуры, обеспечивающие функционирование и развитие основных технологических лесопромышленных предприятий;

3) предприятия материально-технического снабжения регионального лесопромышленного комплекса;

4) научно-исследовательские структуры и образовательные организации, осуществляющие подготовку трудовых ресурсов для регионального лесопромышленного комплекса;

5) организации, осуществляющие поставку средств производства (лесозаготовительного, лесопильного, деревообрабатывающего, химического, противопожарного и иного оборудования) основным производственным лесопромышленным предприятиям.

Субъекты лесопромышленного комплекса объединяются в три крупных блока, исходя из их участия в непосредственном управлении и использовании лесных ресурсов.

Большое количество работ связано с изучением кластерного подхода к развитию регионального лесного комплекса. Представленные в них архитектуры кластеров также могут использоваться как примеры общей архитектуры лесного комплекса. Так, А.А. Киселевой предложен вариант кластерной архитектуры, в котором ядром модели лесопромышленного кластера региона являются предприятия, занимающиеся заготовкой древесины, производством пиломатериалов и деревянной тары, производством целлюлозы, древесной массы,

бумаги и картона, производством фанеры и древесных плит, производством деревянных строительных деталей, производством бумажной и картонной тары, других изделий из бумаги и картона, лесохимические производства. Сбытовые и снабженческие структуры бизнеса функционируют по заказам и договорам с предприятиями, организациями и бизнес-структурами, входящими в ядро кластера. Сервисные структуры непосредственно связаны с производственными функциями и сбытом продукции кластера.

Несмотря на значительные различия в представленных подходах, при описании общей схемы функционирования регионального лесного комплекса можно выделить ряд общих моментов [5]:

1. Лесной сектор представляет собой сложную открытую динамическую систему, в которой проявляются тесные взаимосвязи между элементами из различных предметных областей: экологической, социальной, экономической, культурной, образовательной, государственного управления и т.д. Одновременная сложность и открытость системы обуславливает возможность многовариантности архитектур подобных систем.

2. При описании подобные системы принято представлять в виде набора взаимосвязанных систем.

3. Существующие модели структурной формализации предметной области регионального лесного комплекса сконцентрированы на описании структуры управляющих лесным комплексом систем и поэтому не могут быть напрямую использованы в качестве основы создания архитектуры модели, предназначенной для поиска общих путей совершенствования государственного управления лесным комплексом, связанных, в том числе, с подбором управляющих воздействий.

4. Большое количество работ связано с изучением кластерного подхода к развитию регионального лесного комплекса. Представленные в них архитектуры кластеров также могут использоваться как примеры общей архитектуры лесного комплекса.

5. Основной целью использования модели должна стать парадигма устойчивого управления лесами.

6. Под управлением лесным комплексом стоит понимать целенаправленное воздействие органов управления лесопромышленным комплексом — субъекта управления — на объект управления — лесопромышленный комплекс, которое обеспечивает достижение стратегических целей лесопромышленного комплекса с учетом конкретных предпосылок и условий регионов.

7. При построении модели регионального лесного комплекса необходимо рассматривать множество взаимодействующих компонентов, относящихся по своей природе к различным системам. Все эти компоненты должны иметь набор свойств, которые, в конечном итоге, в совокупности определяют текущие показатели функционирования лесного комплекса.

Для моделирования отдельных элементов работы лесоперерабатывающих и лесозаготовительных предприятий традиционно использовались ставшие уже классическими методы аналитического моделирования. Но, вследствие большой сложности реальной системы взаимоотношений в лесном хозяйстве, применение этих методов сталкивается с рядом проблем, основной из которых является необходимость поиска «золотой середины» между упрощением и сложностью системы. В результате чего при разработке моделей приходится отбрасывать факторы, не влияющие (слабо влияющие) на исследуемые характеристики системы. Выбор факторов в данном случае носит ярко выраженный субъективный характер, так как во многом зависит от квалификации и интуиции исследователя. Кроме того, при моделировании сложных систем с применением аналитического и имитационного методов достаточно сложным оказывается вопрос внесения изменений, порой даже незначительных, в структуру модели. В этой связи для решения задач моделирования сложных систем возникла парадигма агент-ориентированного моделирования, использующая интеллектуальных агентов как высокоуровневую абстракцию для формализации и структурирования предметной области и как мощное программное средство для разработки и реализации сложных моделей.

Агент-ориентированное моделирование является разновидностью имитационного моделирования. Его отличительная особенность —

использование в качестве основных элементов агентов, имеющих индивидуальное поведение. Агенты характеризуются такими свойствами, как активность, инициативность, способность обучаться, общаться, интеллект и т.д. При этом каждый из агентов обладает не только заданным набором личностных характеристик, но и целевой функцией, на основе чего имитируются реакции на изменения внешней среды и поведение других агентов.

К одному из основных преимуществ агент-ориентированного подхода относится возможность моделирования системы, максимально приближенной к реальности. Ограничения на степень детализации таких моделей накладываются только вычислительной производительностью используемых компьютеров [12]. Другим важным преимуществом моделей такого типа является моделирование «снизу-вверх», обеспечивающее возможность построения адекватных моделей при отсутствии знаний о глобальных зависимостях по данной предметной области.

Обзор зарубежных АОМ в лесной отрасли

В настоящее время, несмотря на относительную «молодость» метода агент-ориентированного моделирования, спектр научных работ, посвященных его применению в различных отраслях лесного хозяйства, достаточно широк. В основном это касается зарубежных исследований. Большое количество материалов посвящено различным аспектам моделирования рынков лесоматериалов. Klaus G. Troitzsch [30] делает попытку применить опыт агент-ориентированных моделей рынка городского жилья в Бразилии и немецкого фармацевтического рынка для построения модели рынка древесины в Швейцарии. Отмечая значительные отличия лесной отрасли по сравнению с другими сферами промышленности, Klaus G. Troitzsch приходит к выводу, что для понимания реального рынка древесины модели на основе агентов являются более подходящими, чем классические модели рынков, так как они могут учитывать все особенности, характерные для лесного хозяйства.

Ernst Gebetsroither, Alexander Kaufmann, Ute Gigler, Andreas Resetarits [21] представляют комплексную агент-ориентированную модель процессов самоорганизации при адаптивном управлении лесами. Предлагаемая модель состоит из двух взаимосвязанных, но в остальном

независимых подсистем, реализованных с использованием агентов. Первая, социально-экономическая подсистема представлена агентами, выполняющими роли по заготовке, переработке и продаже древесины. Вторая, экологическая подсистема имитирует процессы развития лесов. В качестве агентов выступают деревья, конкурирующие между собой за жизненное пространство.

Вызывает определенный интерес предлагаемая в работах F. Kostadinova и др. [24, 25] модель рынка древесины Швейцарии, построенная с использованием АОМ. Моделирование проводилось на базе швейцарского кантона Aargau, что было обусловлено целым рядом факторов:

- относительная доступность необходимых исходных данных для моделирования;
- особенности географического положения и условия для производства древесины среди швейцарских кантонов;
- наличие необходимого, но недостаточного с точки зрения моделирования количества агентов, позволяющих обеспечить большое число взаимодействий между собой, обеспечив при этом разумные сроки выполнения вычислений.

При построении модели учитывались только производство и потребление лесной древесины, в том числе древесного топлива, произведенного из отходов промышленного производства, исключая другие источники, например вторичную переработку древесины.

Для калибровки модели использовались следующие данные:

- количество, размер и расположение систем отопления на древесном топливе в Швейцарии;
- количество лесозаготовителей и количество лесов по результатам третьей швейцарской национальной инвентаризации лесов (2010 год);
- динамика прогнозных цен на нефть за прошедший период для определения, среди прочих факторов, привлекательности для потребителей установки систем отопления на древесном топливе;
- классификация и типизация лесохозяйственных и лесоперерабатывающих предприятий, частных лесовладельцев, потребителей древесного топлива, экспертные оценки.

В модели выделены следующие классы агентов:

- Лесничества – специализированные организации по управлению лесами от имени третьих лиц (муниципальные и государственные леса).
- Частные лесовладельцы – собственники лесных участков. В среднем размеры участков, находящихся в частной собственности, гораздо меньше по сравнению с лесами, управляемыми лесничествами. В базовом сценарии модели 50% частных лесовладельцев мало заинтересованы в производстве древесины и остаются на протяжении моделирования неактивными.
- Продавцы древесины – посредники по продаже круглого леса и древесного топлива на обоих рынках. Самостоятельно не производят и не потребляют ни того ни другого.
- Лесопилки – единственный класс в модели, потребляющий круглый лес. Одновременно выступает в качестве поставщика древесного топлива.
- Малые частные потребители древесного топлива – отдельно стоящие дома с системой

отопления на древесном топливе. Потребляют относительно небольшое количество древесины.

- Коммерческие потребители древесного топлива – частные организации, обслуживающие коммерческие здания с использованием системы отопления на древесном топливе.
- Общие потребители древесного топлива – в основном муниципалитеты или подобные организации, обслуживающие здания, находящиеся в государственной собственности (школы, пожарная охрана и т.п.). Пользуются определенными льготами на рынке древесного топлива.
- Операторы районных теплосетей – коммерческие производители теплоэнергии. Обслуживают здания, подключенные к центральной системе отопления.
- Потребители балансовой древесины – химическая и бумажная промышленность. Конкурируют за древесное сырье с другими потребителями древесного топлива.

Общая схема взаимодействия агентов на рынке и с внешней средой представлена на рисунке 1.

Рис. 1. Схема взаимодействия агентов на рынке и с внешней средой



Источник: Kostadinov F., Steubing B. An agent-based model of an energy wood market in a Swiss region [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.issw.ch/fe/waldressourcen/produktionssysteme/publikationen/ESSA2011_FabianKostadinov_v2.pdf

Все агенты имеют фиксированное географическое положение, обладают набором параметров и ресурсов, состоящих из леса (для производителей древесины), запаса круглого леса и древесного топлива (для потребителей древесины), денег. Агенты действуют как поставщики, потребители или посредники на рынке круглого леса или древесного топлива, в зависимости от своей роли. Для каждого класса агентов определены алгоритмы действий и принятия решений, при этом наряду с критериями максимизации прибыли модель учитывает критерии «ценности дружбы» (совершение операций покупки-продажи с агентами, являющимися друзьями), критерии «поддержки местных рынков» (на выбор контрагента может повлиять желание поддержать местных производителей).

Вместе с тем необходимо отметить и ряд ограничений модели. Как видно из рис. 1, часть рынков, таких как нефтегазовый, рынок центрального отопления, электроэнергетики, лесоматериалов и целлюлозно-бумажной промышленности, выведены за рамки модели и рассматриваются как условия внешней среды. Хотя некоторые агенты достаточно сильно зависят от этих высокоагрегированных рынков, их взаимодействия, как в случае с рынками круглого леса и древесного топлива, не происходит.

В предлагаемой модели достаточно сильно упрощена схема естественного изменения лесного фонда. Лесные ресурсы моделируются как однородные возобновляемые ресурсы определенного размера с естественным верхним порогом. Рост деревьев распределяется с течением времени. Модель не включает сезонные воздействия, изменяющиеся погодные условия, стихийные бедствия и т.п.

Впрочем, и сами авторы на данном этапе ставили скорее задачу доказательства возможности и перспективности агент-ориентированного моделирования для построения моделей таких сложных систем, как рынки леса.

Для большинства рассматриваемых моделей характерной особенностью является выделение в качестве основных агентов тех или иных объединений людей: частных домохозяйств, муниципалитетов, коммерческих организаций и т.п. Так в работах Stefan Holm и др. [23], Jessica E. Leahy и др. [26], Diana D. Valeriano и др. [31] лес рассматривается как один из ресурсов с достаточно простым, не требующим сложного

моделирования алгоритмом развития. Другой подход к применению методов агент-ориентированного моделирования используется в работах Liliana Pérez и Suzana Dragicevic [28], посвященных вопросам защиты лесных массивов от заражения насекомыми.

В исследованиях рассматривается влияние методов защиты лесов Британской Колумбии (Канада) от вспышек заражения горным сосновым лубоедом (*Dendroctonus ponderosae* Hopkins, DENCPO), приведшим к гибели деревьев на площади в несколько тысяч квадратных километров. С учётом того, что динамика заражения DENCPO, происходящая между стволами деревьев и насекомыми внутри них, является частью сложного пространственно-временного процесса, на первом этапе была предложена агент-ориентированная модель поведения колоний насекомых, эффективно отражающая закономерности гибели деревьев из-за вспышек заражения DENCPO. На следующем этапе в модель были добавлены различные сценарии управления лесным хозяйством с целью оценки эффективности защиты лесов от вредителей.

Таким образом в модели представлены три типа агентов: агент Жук, агент Сосна и агент Управление лесами.

Модель агента Жук описывает поведение и жизненный цикл DENCPO, основанный на ряде правил, определяющих схемы передвижения в лесном массиве, выбора здоровых деревьев для колонизации и заражения.

При выборе очередного дерева для атаки модель Жука учитывает такие параметры, как схема расположения деревьев в лесу, реализованная с использованием нечетких множеств, естественный диапазон дальности полета DENCPO, преобладающая роза ветров в регионе. Далее каждое дерево, находящееся в потенциальной зоне атаки, оценивается агентом Жук по четырем параметрам: состояние здоровья дерева, тип дерева, средний возраст и диаметр ствола, в зависимости от которых и принимается решение о заселении или продолжении поиска.

За свой жизненный цикл агент Жук проходит стадии от яйца, личинки и до жука самца или самки. Для каждой стадии характерен свой набор параметров и моделей поведения. При моделировании учитывается и сезонный фак-

тор, когда в период зимних холодов погибает порядка 80% популяции DENCPO.

Модель агента Сосна реализована для имитации встроенных механизмов сопротивления и самозащиты деревьев против насекомых-вредителей. Этот агент представляет собой автономный субъект (отдельное дерево), характеризующийся целым рядом параметров, влияющих на вероятность заражения, таких как тип, возраст, высота, состояние здоровья, обхват ствола. Для оценки плотности поселения Жука на дереве агенты Сосна отвечают за расчет общей площади поверхности ствола и на основании данных расчетов оценивают плотность заселения Жука на 1 м². При превышении определенных значений плотности Жуки начинают поиск новых деревьев для заражения.

Для реализации борьбы со вспышками инвазий DENCPO в модель введен агент Управление лесами. В задачи агента входит оценка степени зараженности каждой лесной площадки с целью принятия решения о проведении тех или иных лесозащитных мероприятий в зависимости от заложенного в модель сценария. Модель предусматривает три варианта действий агента Управление лесами. Первый вариант предполагает отсутствие активных действий со стороны агента и предоставляет ему только возможность наблюдения и оценки. Второй и третий варианты предусматривают возможность принятия решений о проведении выборочных или сплошных санитарных рубок с целью предотвращения дальнейшего заражения здоровых деревьев или целых лесных участков.

Проведенный ряд модельных экспериментов подтвердил высокую эффективность активных стратегий защиты леса, хотя с нашей точки зрения данная модель интересна самим выбором агентов, дающим новый взгляд на прогнозирование развития лесной экосистемы.

Достаточно большое число исследований по применению агент-ориентированных моделей в лесной отрасли посвящено проблематике борьбы с лесными пожарами. Так, в исследовании Guangjun Zhang и Yaodong Li [22] реализуется агент-ориентированная модель лесного пожара, рассматриваемая как типичная открытая комплексная система. Muaz A. Niazi и др. [27] предлагают виртуальную мультиагентную систему проверки лесных пожаров, основанную на FWI (Fire Weather Index – индекс пожар-

ной опасности по погодным условиям). Данные работы носят скорее теоретический характер и призваны подтвердить возможность применения предлагаемых методов моделирования к сложным системам.

Отдельно хочется выделить работу Thomas A. Spies и др. [29], в которой на основе агент-ориентированной модели взаимосвязанных социальной и природной систем оценивается влияние альтернативных сценариев управления на показатели пожарной и экологической безопасности лесов в пожароопасных регионах в Орегоне (США).

Общая схема модели представлена на *рис. 2*.

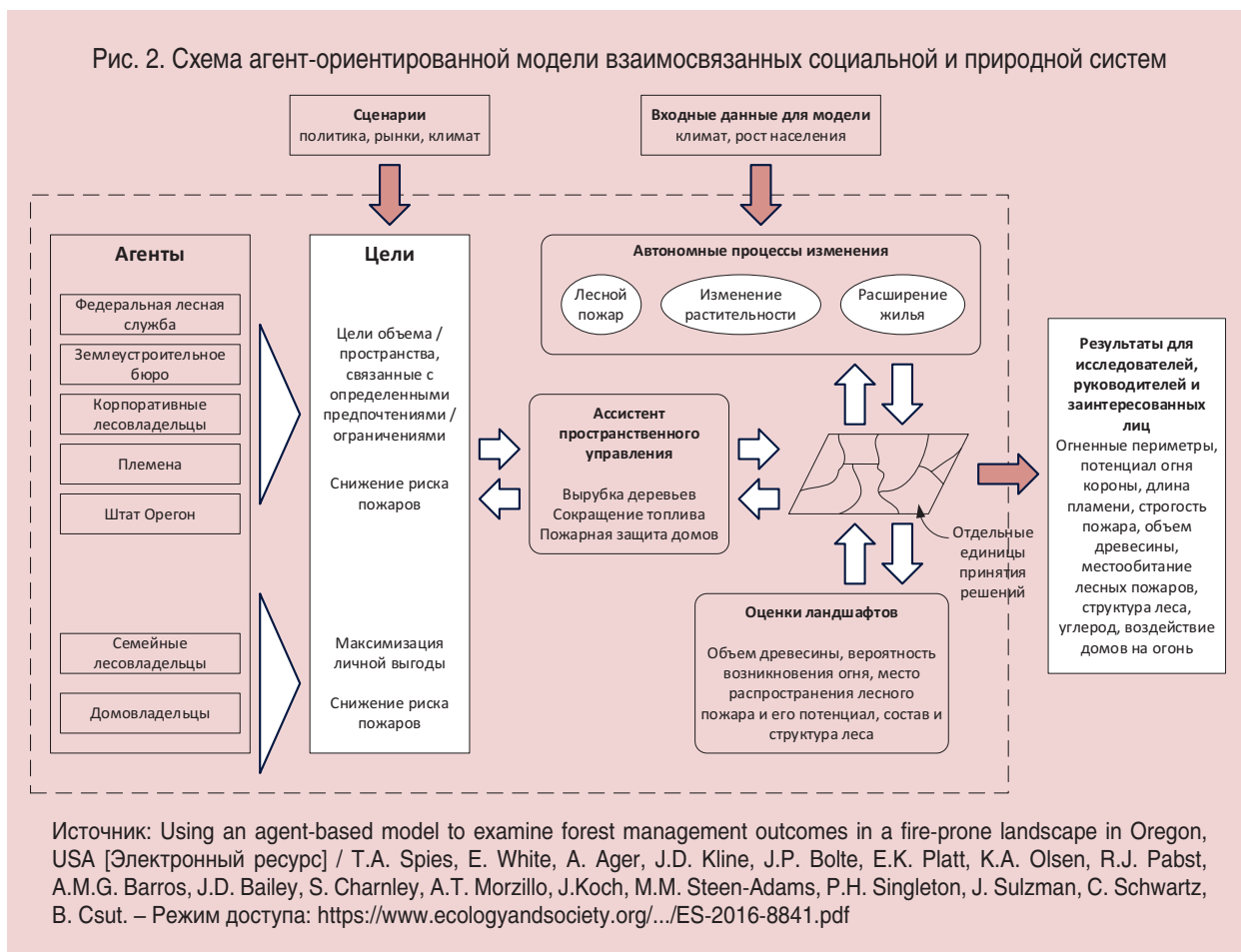
В качестве агентов в модели представлены крупные землевладельцы, осуществляющие лесохозяйственную деятельность, способную влиять на изменение ландшафта. Лесные пожары моделируются с помощью полужемпирического алгоритма распространения лесного пожара, учитывающего состав и структуру леса, топографию местности и погодные условия. Изменения в окружающей среде, произошедшие как в результате деятельности человека, так и вследствие естественных причин (в том числе пожаров, ветровалов, смены породы), создают обратную связь, которая влияет на решения о будущих управленческих воздействиях человека, а также потенциальной угрозе лесных пожаров.

Российский опыт агент-ориентированного моделирования лесного комплекса

В России направление агент-ориентированного моделирования в последние годы находит все большее распространение. Появляются разработки ученых в сфере АОМ применительно к сложным социальным системам, муниципальному, региональному и государственному управлению и т.д. Это, в частности, исследования таких авторов, как В.Л. Макаров, А.Р. Бахтизин, Е.Д. Сушко [10, 11, 12], В.И. Суслов [17], М.Р. Фаттахов [18] и др. В то же время количество АОМ в лесной сфере носит единичный характер.

Так, в работах П.Т. Воронкова и др. [3, 4] поднимаются общие вопросы применения имитационного моделирования в лесном хозяйстве. А в качестве наиболее комплексного, системного исследования можно отметить работу Ю.Ш. Блама [2], в которой, по сути, делается попытка построения укрупненной ар-

Рис. 2. Схема агент-ориентированной модели взаимосвязанных социальной и природной систем



хитектуры агент-ориентированной модели регионального лесного комплекса, представленного несколькими лесозаготовительными предприятиями (леспромхозами – ЛПХ) и одним комплексным промышленным предприятием, включающим лесозаготовительное и лесоперерабатывающее производства (лесопромышленный комплекс – ЛПК).

В модели рассматриваются различные варианты проведения рубок (сплошная и выборочная), реализации заготовленной древесины, учитываются сезонные факторы, прямые и косвенные издержки, связанные с заготовкой древесины. В качестве основного критерия рассматривается условная годовая прибыль.

Ю.Ш. Блам на первом этапе формализует экономическую постановку задачи в виде оптимизационной линейной производственно-транспортной модели, а затем преобразует ее в комплекс агент-ориентированных моделей, описывающих поведение предприятий ЛПХ и ЛПК, «прочих» агентов регионального уровня,

определяющих внешние параметры функционирования регионального лесопромышленного комплекса, а также описывает логику и последовательность их взаимодействия.

Автор выделяет следующие виды агентов: агенты ЛПХ и СПК, представленные оптимизационными производственно-транспортными моделями, агенты Администрация, Рынки и Финансы, представленные имитационными блоками, причем управленческие решения для этих типов агентов формируются в модели с учетом внешних воздействий.

На этапе отладки эти агенты представляют собой информационную базу, сформированную по сценарным расчетам базовой модели, и генерируют для первых четырех расчетных кварталов параметры, совпадающие с оптимальным решением исходной комплексной модели. Входы в модели, при переходе в следующий расчетный период, фиксируются с учетом решения по ним за предыдущий период и информации от внешних агентов.

В продолжение исследования предполагается дальнейшее развитие представленной схемы взаимодействия агентов, уточнение модельного описания функционирования предприятий в современных институциональных и экономических условиях, а также уточнение функционального представления внешних агентов отраслевой подсистемы региона.

Как и в зарубежных работах, определенный интерес вызывают исследования возможности применения математического моделирования для борьбы с лесными пожарами. Здесь можно отметить работы Д.О. Морозова, А.А. Дектерева и др. [13, 14], Г.В. Соколовой [16], А.Н. Раздайводина и Д.Ю. Ромашкина [15]. Но наиболее полно возможности агент-ориентированных моделей отражены в исследовании С.В. Ярового и Г.А. Доррера [19, 20], рассматривающего задачу моделирования лесопожарных ситуаций. Для ее решения предлагается использовать подход АОМ совместно с технологией геоинформационных систем (ГИС), что позволяет объединить преимущества обоих направлений. Мультиагентная модель, реализованная на базе вложенных сетей Петри, позволяет как прогнозировать распространение кромки лесного пожара, так и имитировать прямой метод тушения низового лесного пожара немеханизированными противопожарными отрядами.

В качестве среды моделирования в данном исследовании рассматривается участок карты реальной местности с нанесенным на нее слоем, характеризующим пожароопасность растительных горючих материалов, которая определяется на основании пирологического описания выделов карты лесов. Таким образом, для каждого местоположения на карте заранее задается тип поверхности, определяющий наличие основных проводников горения и их тип, в зависимости от которых устанавливаются базовая скорость распространения кромки пожара и теплота воспламенения слоя.

В качестве основных показателей среды учитываются также данные о скорости и направлении ветра и классе пожарной опасности.

В предлагаемой модели используются агенты двух типов. Агенты первого типа представляют собой участки фронта распространения пожара и используются для моделирования лесного пожара, представляя собой, в совокупности, контур пожара на карте. Модель допускает

наличие одновременно нескольких таких контуров, распространяющихся независимо друг от друга в различных частях карты.

Агенты второго типа имитируют действия противопожарных сил и оказывают воздействие на агентов первого типа.

В исследовании достаточно подробно описаны параметры, характеризующие агентов обоих типов, их цели, возможные состояния, условия и алгоритмы перехода из одного состояния в другое. Результаты моделирования позволяют решать ряд связанных задач: во-первых, получить картину распространения лесного низового пожара в реальной местности и при определенных погодных условиях; во-вторых, определить необходимое количество средств пожаротушения для локализации низового пожара в этих условиях.

Заключение

Изучив накопленный к настоящему времени опыт агент-ориентированного моделирования в лесном хозяйстве, необходимо отметить следующее:

- спектр современных исследований по применению агент-ориентированного моделирования в различных отраслях лесного хозяйства достаточно разнообразен, но при этом на сегодняшний день не существует научных работ в области построения комплексных моделей лесного комплекса уровня крупных территориальных образований, предназначенных для его перспективного анализа и планирования развития;
- в сравнении с зарубежными разработками спектр отечественных исследований выглядит скромнее;
- характерной особенностью большинства моделей является выделение в качестве основных агентов тех или иных объединений людей: частных домохозяйств, муниципалитетов, коммерческих организаций и т.п., а лес рассматривается как один из ресурсов с достаточно простым, не требующим сложного моделирования алгоритмом развития;
- как зарубежные, так и российские исследователи в области применения агент-ориентированного моделирования в лесном хозяйстве отмечают высокую сложность лесного комплекса как объекта исследования вследствие большого числа взаимозависимых и, зачастую, трудно предсказуемых факторов, таких

как нестабильность и изменение климатических условий, вероятность стихийных бедствий (пожары и ветровалы), необходимость долгосрочного прогнозирования;

– классические методы аналитического и имитационного моделирования, традиционно использовавшиеся для моделирования отдельных элементов работы лесоперерабатывающих и лесозаготовительных предприятий, вследствие большой сложности реальной системы взаимоотношений в лесном хозяйстве не в состоянии обеспечить соблюдение требований, предъявляемых к современным системам поддержки принятия управленческих решений в региональном лесном комплексе;

– использование агент-ориентированного подхода в моделировании регионального лесного комплекса позволит решить вопрос сложности и масштабируемости модели. Возможности построения многоуровневых и вложенных агентов, индивидуальность агентов как нельзя лучше подходят для моделирования таких сложных систем.

Важнейшей задачей при построении агент-ориентированных моделей лесного хозяйства является определение общих подходов к формированию состава агентов и созданию среды их функционирования. Одновременная сложность и открытость системы обуслови-

вает возможность многовариантности архитектур подобных систем. Вследствие этого, возникает необходимость качественной проработки процессов идентификации элементов модели, решение вопросов их абстрактного представления, при котором будет обеспечена возможность описания механизмов их взаимодействия, формирования входных воздействий и получения требуемых результатов [6]. При этом необходимо учитывать влияние пространственных факторов размещения элементов, а также многоуровневый аспект в моделях их поведения. Важной задачей при этом является выбор масштаба модели, при котором возможно качественное и эффективное получение подтверждающих адекватность результатов, что позволит говорить о возможности ее использования в региональных системах управления.

До настоящего времени исследований по общей проблематике построения агент-ориентированных моделей лесного комплекса не проводилось. Полученные результаты анализа существующих в лесной сфере АОМ позволяют оценить перспективность применения агент-ориентированного подхода для построения моделей регионального лесного комплекса, использовать имеющийся опыт, формулировать направления развития дальнейших исследований.

Литература

1. Антонова, Н.Е. Управление лесным комплексом многолесного региона / Н.Е. Антонова, А.С. Шейнгауз. – Владивосток: Дальнаука, 2002. – 192 с.
2. Блам, Ю.Ш. Агентно-ориентированный подход к реализации модели лесного комплекса региона [Текст] / Ю.Ш. Блам // Вестник КузГТУ. – 2014. – №4. – С. 176–180.
3. Воронков, П.Т. Имитационное моделирование в анализе использования лесов [Текст] / П.Т. Воронков, В.В. Дегтерев, А.С. Шальнев // Инновации и технологии в лесном хозяйстве–2013. Материалы III Международной научно-практической конференции, Санкт-Петербург, ФБУ «СПбНИИЛХ», 22-24 мая 2013 г. – Ч. 1. – СПб.: СПбНИИЛХ, 2013. – С. 132.
4. Воронков, П.Т. Применение методов имитационного моделирования динамики качественных показателей древостоя [Текст] / П.Т. Воронков, В.В. Дегтерев // Инновации и технологии в лесном хозяйстве» ИТФ–2016. Тезисы докладов V Международной научно-практической конференции, Санкт-Петербург, ФБУ «СПбНИИЛХ», 31 мая – 2 июня 2016 г. – СПб: СПбНИИЛХ, 2016. – 161 с. – С. 45.
5. Дианов, С.В. Архитектура модели перспективного анализа и планирования развития регионального лесного комплекса [Текст] / С.В. Дианов // Проблемы развития территории. – 2017. – № 5. – С. 148–163.
6. 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 IX Международной научно-технической конференции. Вологда: ВоГУ, 2017. – С. 50–53.

7. Иванова, Т.Н. Особенности формирования механизма управления лесопромышленным комплексом [Текст] / Т.Н. Иванова // Вестник МГТУ. – 2006. – Том 9. – № 4. – С. 629–632.
8. Киселева, А.А. Кластерные основы и методический инструментарий конкурентного развития регионального лесопромышленного комплекса [Текст]: автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата экономических наук / А.А. Киселева. – Пермь, 2015.
9. Киселева, А.А. Создание регионального лесопромышленного кластера как основа повышения конкурентоспособности отрасли [Текст] / А.А. Киселева // Вестник Пермского университета. – 2014. – № 3. – С. 52–57.
10. Макаров, В.Л. Имитация особенностей репродуктивного поведения населения в агент-ориентированной модели региона [Текст] / В.Л. Макаров, А.Р. Бахтизин, Е.Д. Сушко // Экономика региона. – 2015. – № 3. – С. 313–322.
11. Макаров, В.Л. Компьютерное моделирование взаимодействия между муниципалитетами, регионами, органами государственного управления [Текст] / В.Л. Макаров, А.Р. Бахтизин, Е.Д. Сушко // Проблемы управления. – 2013. – №6. – С. 31-40.
12. Макаров, В.Л. Новый инструментарий в общественных науках – агент-ориентированные модели: общее описание и конкретные примеры [Текст] / В.Л. Макаров, А.Р. Бахтизин. // Экономика и управление. – 2009. – №12 (50). – С. 13-25.
13. Морозов, Д.О. К вопросу о математическом моделировании катастрофических лесных пожаров [Текст] / Д.О. Морозов, А.А. Дектерев, Е.И. Пономарев // Инновации и технологии в лесном хозяйстве–2013. Материалы III Международной научно-практической конференции, Санкт-Петербург, ФБУ «СПбНИИЛХ», 22-24 мая 2013 г. – Ч. 2. – СПб.: СПбНИИЛХ, 2013. – 315 с. – С. 115.
14. Морозов, Д.О. Численное моделирование распространения фронта низового пожара [Текст] / Д.О. Морозов, А.А. Дектерев, К.В. Милин // Инновации и технологии в лесном хозяйстве ITF-2014. Тезисы докладов IV Международной научно-практической конференции, Санкт-Петербург, ФБУ «СПбНИИЛХ», 27–28 мая 2014 г. – СПб.: СПбНИИЛХ, 2014. – 136 с. – С. 84.
15. Раздайводин, А.Н. Комплексная оценка опасности лесных пожаров в зонах радиоактивного загрязнения лесов [Текст] / А.Н. Раздайводин, Д.Ю. Ромашкин // Труды Санкт-Петербургского НИИ лесного хозяйства. – СПб., 2011. – Вып. 1(24). – Ч. 1. – С. 239.
16. Соколова, Г.В. Прогнозная оценка вероятности развития лесных пожаров до крупномасштабных в районах северо-восточной Азии [Текст] / Г.В. Соколова // Труды Санкт-Петербургского НИИ лесного хозяйства. – СПб., 2011. – Вып. 1(24). – Ч. 1. – С. 234.
17. Опыт агент-ориентированного моделирования пространственных процессов в большой экономике [Текст] / В.И. Суслов, Д.А. Доможиров, В.С. Костин, Л.В. Мельникова, Н. М. Ибрагимов, А.А. Цыплаков // Регион: экономика и социология. – 2014. – № 4. – С. 32–54.
18. Фаттахов, М.Р. Агент-ориентированная модель социально-экономического развития Москвы [Текст] / М.Р. Фаттахов // Экономика и математические методы. – 2013. – № 2. – С. 30–42.
19. Яровой, С.В. Агентный подход при моделировании лесопожарных ситуаций [Текст] / С.В. Яровой // Программные продукты и системы. – 2016. – Т. 29. – № 3. – С. 101–108.
20. Яровой, С.В. Применение агентного подхода для моделирования процессов распространения и локализации природных пожаров [Текст] / С.В. Яровой, Г.А. Доррер // Хвойные бореальной зоны. – 2016. – Т. 37. – № 5-6. – С. 237–240.
21. Gebetsroither, E. Agent-based modelling of self-organization processes to support adaptive forest management [Электронный ресурс] / E. Gebetsroither, A. Kaufmann, U. Gigler, A. Resetarits // Contributions to Economics. – 2006. – Part 4. – Pp. 153–172. Режим доступа: http://dx.doi.org/10.1007/3-7908-1721-X_8
22. Guangjun Zhang. Agent-based modeling and simulation for open complex systems [Электронный ресурс] // Guangjun Zhang, Yaodong Li. Режим доступа: <http://ieeexplore.ieee.org/document/5456783/>
23. Holm, S. Enhancing Agent-Based Models with Discrete Choice Experiments [Электронный ресурс] / S. Holm, R. Lemm, O. Thees, L.M. Hilty Режим доступа: <http://jasss.soc.surrey.ac.uk/19/3/3.html>
24. Kostadinov, F. An agent-based model of an energy wood market in a Swiss region [Электронный ресурс] / F. Kostadinov, B. Steubing // Режим доступа: http://www.issw.ch/fe/waldressourcen/produktionssysteme/publikationen/ESSA2011_FabianKostadinov_v2.pdf
25. Kostadinov, F. Simulation of a Swiss wood fuel and roundwood market: An explorative study in agent-based modeling [Электронный ресурс] / F. Kostadinov, S. Holm, B. Steubing, O. Thees, R. Lemm // Режим

- доступа: http://www.wsl.ch/fe/waldressourcen/produktionssysteme/publikationen/Kostadinov_et_al_-_Simulation_of_a_Swiss_wood_fuel_and_roundwood_market_An_explorative_study_in_agent-based_modeling.pdf
26. Leahy, J.E. Agent-Based Modeling of Harvest Decisions by Small Scale Forest Landowners in Maine, USA [Электронный ресурс] / J.E. Leahy, E. Gorczyca Reeves, K.P. Bell, C.L. Straub, J.S. Wilson. — Режим доступа: <https://www.hindawi.com/journals/ijfr/2013/563068/>
 27. Niazi Muaz, A.K. Verification and Validation of an Agent-Based Forest Fire Simulation Model [Электронный ресурс] / A.K. Niazi Muaz, Q. Siddique, A. Hussain, M. Kolberg. Режим доступа: <https://www.stir.ac.uk/research/hub/publication/723>
 28. Pérez, L. Exploring Forest Management Practices Using an Agent-Based Model of Forest Insect Infestations [Электронный ресурс] / L. Pérez, S. Dragicevic // International Congress on Environmental Modelling and Software. Режим доступа: <http://scholarsarchive.byu.edu/iemssconference/2010/all/364>
 29. Spies, T.A. Using an agent-based model to examine forest management outcomes in a fire-prone landscape in Oregon, USA. [Электронный ресурс] / T.A. Spies, E. White, A. Ager, J.D. Kline, J.P. Bolte, E.K. Platt, K.A. Olsen, R.J. Pabst, A.M.G. Barros, J.D. Bailey, S. Charnley, A.T. Morzillo, J.Koch, M.M. Steen-Adams, P.H. Singleton, J. Sulzman, C. Schwartz, B. Csut/ Режим доступа: <https://www.ecologyandsociety.org/.../ES-2016-8841.pdf>
 30. Troitzsch, K. Agentenbasierte Modellierung von Märkten [Электронный ресурс] / Klaus G. Troitzsch // Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen (SZF). — 2012. — Vol. 163/10. — Pp. 408–416. Режим доступа: <http://szf-jfs.org/doi/pdf/10.3188/szf.2012.0408>
 31. Valeriano, D.D. Agent-Based Model to simulate Araucaria angustifolia Forest Dynamics as a tool for Forest Management [Электронный ресурс] / D. D. Valeriano, M. Vuurman, D.M. Valeriano, S. Amaral // Режим доступа: <http://www.lbd.dcc.ufmg.br/colecoes/wcama/2014/002.pdf>

Сведения об авторах

Константин Анатольевич Гулин — доктор экономических наук, доцент, заместитель директора, заведующий отделом проблем научно-технологического развития и экономики знаний, Вологодский научный центр РАН (160014, Российская Федерация, г. Вологда, ул. Горького, д. 56а; e-mail: gil@vssc.ac.ru)

Михаил Борисович Антонов — директор, ООО «ЛанЭкс» (160012, Российская Федерация, г. Вологда, Советский пр., 62–12; e-mail: mbantonov@mail.ru)

Gulin K.A., Antonov M.B.

Theoretical Aspects of Agent-Based Modeling in the Development of the Forest Complex

Abstract. One of the ways to ensure sustainable economic growth in modern Russia is to enhance the efficiency of utilization of forest resources. The forest complex is a comprehensive open system with close relationships between different aspects such as ecological, social, economic, cultural, educational, and public administration. It is difficult to find a comprehensive solution to the issues of development of the forest complex if there is no evidence-based system for management decision-making. One of the promising areas of scientific research in this direction could be the application of agent-based models simulating the processes of using, protecting, and reproducing forests, forest products and forest management. The aim of the paper is to study scientific approaches to the construction of agent-based models applied to the forest sector in order to define common approaches to the formation of a set of agents and create an environment for their functioning. We provide an overview of the experience of simulation modeling of individual processes in the forest complex with the use of the agent-based approach. We give a general characteristic of the problems associated with the management of the forest complex in Russia (at the federal and regional levels). We provide an overall assessment of a high complexity of the forest complex

as an object of study. The article presents a brief overview of relevant Russian and foreign research devoted to the general methodological issues of simulating the forest complex and specific models implemented with the use of an agent-based approach: the model for the Swiss timber market; the model for protection of forests in British Columbia (Canada) from insect infestation; the models for predicting and controlling forest fires, an enlarged architecture of an agent-based model for the regional forest complex. We define requirements for the regional forest complex model and consider individual aspects in the implementation of its elements. When developing the architecture of the model, we use comprehensive, system, ecosystem and institutional approaches, which allows us to create a model closest to the real forest complex. In conclusion, the article provides a general assessment of the efficiency of application of agent-based modeling in the forest sector.

Key words: agent-based modeling, forest complex, systems for support to decision-making.

References

1. Antonova N.E., Sheingauz A.S. *Upravlenie lesnym kompleksom mnogolesnogo regiona* [Managing the forest complex in a thickly wooded region]. Vladivostok: Dal'nauka, 2002. 192 p. (In Russian).
2. Blam Yu.Sh. Agentno-orientirovannyi podkhod k realizatsii modeli lesnogo kompleksa regiona [Agent-oriented approach to the implementation of the model forest complex region]. *Vestnik KuzGTU* [Bulletin KuzSTU], 2014, no. 4, pp. 176–180. (In Russian).
3. Voronkov P.T., Degterev V.V., Shal'nev A.S. Imitatsionnoe modelirovanie v analize ispol'zovaniya lesov [Simulation modelling in the analysis of the use of forests]. In: *Innovatsii i tekhnologii v lesnom khozyaistve—2013. Materialy III Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii, Sankt-Peterburg, FBU "SPbNIILKh", 22-24 maya 2013 g. — Ch. 1* [Innovations and technologies in forestry—2013. Proceedings of the 3rd International scientific-practical conference, Saint Petersburg, Saint Petersburg Forestry Research Institute, May 22–24, 2013. Part 1]. Saint Petersburg: SPbNIILKh, 2013. P. 132. (In Russian).
4. Voronkov P.T. Degterev V.V. Primenenie metodov imitatsionnogo modelirovaniya dinamiki kachestvennykh pokazatelei drevostoya [Application of simulation methods of the dynamics of the quality indicators of the forest stand]. In: *Innovatsii i tekhnologii v lesnom khozyaistve ITF—2016. Tezisy dokladov V Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii, Sankt-Peterburg, FBU "SPbNIILKh", 31 maya — 2 iyunya 2016 g.* [Innovations and technologies in forestry—2016. Abstracts of the reports delivered at the 3rd International scientific-practical conference, Saint Petersburg, Saint Petersburg Forestry Research Institute, May 31 — June 2, 2016]. Saint Petersburg: SPbNIILKh, 2016. 161 p. P. 45. (In Russian).
5. Dianov S.V. Arkhitektura modeli perspektivnogo analiza i planirovaniya razvitiya regional'nogo lesnogo kompleksa [Architecture of the model of prospective analysis and planning of regional timber sector development]. *Problemy razvitiya territorii* [Problems of territory's development], 2017, no. 5, pp. 148–163. (In Russian).
6. Dianov S.V. Model' biotopa kak element agent-orientirovannoi modeli regional'nogo lesnogo kompleksa [Model of a biotope as an element of an agent-based model of the regional forestry complex]. In: *Intellektual'no-informatsionnye tekhnologii i intellektual'nyi biznes (INFOS-2017): materialy IX Mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii* [Intelligent information technology and intelligent business (INFOS-2017): proceedings of the 9th International scientific-technical conference]. Vologda: VoGU, 2017. Pp. 50–53. (In Russian).
7. Ivanova T.N. Osobennosti formirovaniya mekhanizma upravleniya lesopromyshlennym kompleksom [Peculiarities of formation of timber industry complex management mechanism]. *Vestnik MGTU* [Vestnik of MSTU], 2006, vol. 9, no. 4, pp. 629–632. (In Russian).
8. Kiseleva A.A. *Klasternye osnovy i metodicheskii instrumentarii konkurentnogo razvitiya regional'nogo lesopromyshlennogo kompleksa: avtoreferat dissertatsii na soiskanie uchenoi stepeni kandidata ekonomicheskikh nauk* [Cluster framework and methodological tools for competitive development of the regional timber industry complex: Ph.D. in Economics dissertation abstract]. Perm, 2015. (In Russian).
9. Kiseleva A.A. Sozdanie regional'nogo lesopromyshlennogo klastera kak osnova povysheniya konkurentosposobnosti otrasli [Establishment of a regional forestry and industry cluster as a basis for increasing the competitiveness of the sector]. *Vestnik Permskogo universiteta* [Perm University Herald], 2014, no. 3, pp. 52–57. (In Russian).

10. Makarov V.L., Bakhtizin A.R., Sushko E.D. Imitatsiya osobennosti reproductivnogo povedeniya naseleniya v agent-orientirovannoi modeli regiona [Simulating the reproductive behavior of a region's population with an agent-based model]. *Ekonomika regiona* [Economy of region], 2015, no. 3, pp. 313–322. (In Russian).
11. Makarov V.L., Bakhtizin A.R., Sushko E.D. Komp'yuternoe modelirovanie vzaimodeistviya mezhdu munitsipalitetami, regionami, organami gosudarstvennogo upravleniya [Computer simulation of interaction between municipalities, regions, government authorities]. *Problemy upravleniya* [Control sciences], 2013, no. 6, pp. 31–40. (In Russian).
12. Makarov V.L., Bakhtizin A.R. Novyi instrumentarii v obshchestvennykh naukakh – agent-orientirovannye modeli: obshchee opisaniye i konkretnye primery [New tools in the social sciences – agent-oriented models: General description and specific examples]. *Ekonomika i upravlenie* [Economics and management], 2009, no. 12 (50), pp. 13–25. (In Russian).
13. Morozov D.O., Dekterev A.A., Ponomarev E.I. K voprosu o matematicheskom modelirovanii katastroficheskikh lesnykh pozharov [To the question of mathematical modeling of catastrophic wildfires]. In: *Innovatsii i tekhnologii v lesnom khozyaistve–2013. Materialy III Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii, Sankt-Peterburg, FBU “SPbNIILKh”, 22-24 maya 2013 g. – Ch. 2* [Innovations and technologies in forestry–2013. Proceedings of the 3rd International scientific-practical conference, Saint Petersburg, Saint Petersburg Forestry Research Institute, May 22 – 24, 2013. Part 2]. Saint Petersburg: SPbNIILKh, 2013. 315 p. P. 115. (In Russian).
14. Morozov D.O., Dekterev A.A., Milin K.V. Chislennoe modelirovanie rasprostraneniya fronta nizovogo pozhara [Numerical simulation of propagation of ground fire]. In: *Innovatsii i tekhnologii v lesnom khozyaistve ITF-2014. Tezisy dokladov IV Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii, Sankt-Peterburg, FBU “SPbNIILKh”, 27-28 maya 2014 g.* [Innovations and technologies in forestry–2014. Abstracts of the reports delivered at the 4th International scientific-practical conference, Saint Petersburg, Saint Petersburg Forestry Research Institute, May 27 – 28, 2014]. Saint Petersburg: SPbNIILKh, 2014. 136 p. P. 84. (In Russian).
15. Razdaivodin A.N., Romashkin D.Yu. Kompleksnaya otsenka opasnosti lesnykh pozharov v zonakh radioaktivnogo zagryazneniya lesov [Comprehensive assessment of the risk of forest fires in the zones of radioactive contamination of forests]. *Trudy Sankt-Peterburgskogo NII lesnogo khozyaistva* [Proceedings of the Saint-Petersburg Forestry Research Institute], 2011, no. 1 (24), part 1, p. 239. (In Russian).
16. Sokolova G.V. Prognoznaya otsenka veroyatnosti razvitiya lesnykh pozharov do krupnomasshtabnykh v raionakh severo-vostochnoi Azii [Forecast estimation of the likelihood of forest fires developing into large-scale ones in the areas of northeast Asia]. *Trudy Sankt-Peterburgskogo NII lesnogo khozyaistva* [Proceedings of the Saint-Petersburg Forestry Research Institute], 2011, no. 1 (24), part 1, p. 234. (In Russian).
17. Suslov V.I., Domozhurov D.A., Kostin V.S., Mel'nikova L.V., Ibragimov N.M., Tsyplakov A.A. Opyt agent-orientirovannogo modelirovaniya prostranstvennykh protsessov v bol'shoi ekonomike [Agent-based modeling of spatial processes in world economy]. *Region: ekonomika i sotsiologiya* [Region: Economics and Sociology], 2014, no. 4, pp. 32–54. (In Russian).
18. Fattakhov M.R. Agent-orientirovannaya model' sotsial'no-ekonomicheskogo razvitiya Moskvy [An agent-based model of socio-economic development of Moscow]. *Ekonomika i matematicheskie metody* [Economics and mathematical methods], 2013, no. 2, pp. 30–42. (In Russian).
19. Yarovoi S.V. Agentnyi podkhod pri modelirovanii lesopozharnykh situatsii [Agent-based approach in modeling forest fire situations]. *Programmnye produkty i sistemy* [Software products and systems], 2016, vol. 29, no. 3, pp. 101–108. (In Russian).
20. Yarovoi S.V., Dorrer G.A. Primeneniye agentnogo podkhoda dlya modelirovaniya protsessov rasprostraneniya i lokalizatsii prirodnykh pozharov [The use of agent-based approach to modeling the propagation and localization of wildfires]. *Khvoynye boreal'noi zony* [Conifers of the boreal zone], 2016, vol. 37, no. 5-6, pp. 237–240. (In Russian).
21. 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: http://dx.doi.org/10.1007/3-7908-1721-X_8
22. Guangjun Zhang, Yaodong Li. *Agent-based modeling and simulation for open complex systems*. Available at: <http://ieeexplore.ieee.org/document/5456783/>
23. Holm S., Lemm R., Thees O., Hilty L.M. *Enhancing Agent-Based Models with Discrete Choice Experiments*. Available at: <http://jasss.soc.surrey.ac.uk/19/3/3.html>
24. Kostadinov F., Steubing B. *An agent-based model of an energy wood market in a Swiss region*. Available at: http://www.issw.ch/fe/waldressourcen/produktionssysteme/publikationen/ESSA2011_FabianKostadinov_v2.pdf

25. Kostadinov F., Holm S., Steubing B., Thees O., Lemm R. *Simulation of a Swiss wood fuel and roundwood market: An explorative study in agent-based modeling*. Available at: http://www.wsl.ch/fe/waldressourcen/produktionssysteme/publikationen/Kostadinov_et_al_-_Simulation_of_a_Swiss_wood_fuel_and_roundwood_market_An_explorative_study_in_agent-based_modeling.pdf
26. Leahy J.E., Gorczyca Reeves E., Bell K.P., Straub C.L., Wilson J.S. *Agent-Based Modeling of Harvest Decisions by Small Scale Forest Landowners in Maine, USA*. Available at: <https://www.hindawi.com/journals/ijfr/2013/563068/>
27. Niazi Muaz A.K., Siddique Q., Hussain A., Kolberg M. *Verification and Validation of an Agent-Based Forest Fire Simulation Model*. Available at: <https://www.stir.ac.uk/research/hub/publication/723>
28. Pérez L., Dragicevic S. Exploring Forest Management Practices Using an Agent-Based Model of Forest Insect Infestations. *International Congress on Environmental Modelling and Software*. Available at: <http://scholarsarchive.byu.edu/iemssconference/2010/all/364>
29. 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*. Available at: <https://www.ecologyandsociety.org/.../ES-2016-8841.pdf>
30. Troitzsch K. 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>
31. Valeriano D.D., Buurman M., Valeriano D.M., Amaral S. *Agent-Based Model to simulate Araucaria angustifolia Forest Dynamics as a tool for Forest Management*. Available at: <http://www.lbd.dcc.ufmg.br/colecoes/wcama/2014/002.pdf>

Information about the Authors

Konstantin Anatol'evich Gulin – Doctor of Economics, Associate Professor, Deputy Director, Head of the Department of Scientific and Technological Development and Knowledge Economics, Vologda Research Center of the Russian Academy of Sciences (56A, Gorky Street, Vologda, 160014, Russian Federation; e-mail: gil@vscc.ac.ru)

Mikhail Borisovich Antonov – Director, OOO LanEks (62-12, Sovetsky Avenue, Vologda, 160012, Russian Federation; e-mail: mantonov@mail.ru)

Статья поступила 13.09.2017.