

ФОРМАЛИЗАЦИЯ ЗАДАЧИ СОЗДАНИЯ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ АГЕНТ-ОРИЕНТИРОВАННОЙ МОДЕЛИ ДЛЯ ОТРАСЛИ ЛЕСНОГО ХОЗЯЙСТВА

Дианов С.В.¹, Алферьев Д.А.¹, Родионов Д.Г.²

¹ Вологодский научный центр Российской академии наук,
Вологда, Российская Федерация;

² Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
Санкт-Петербург, Российская Федерация

Лесной ресурс является одним из самых важных экономических источников преимуществ северо-западных регионов России. Деревья и продукция, получаемая при их переработке, используется во многих сферах человеческой жизнедеятельности, например, мебель различной спецификации, предметы домашнего обихода и интерьера, строительство, химия и др. Леса как таковые также являются значимыми экосистемами, которые являются необходимым элементом при формировании безопасных условий проживания человека (переработка углекислых газов в кислород) и флоры и фауны, которая в нём обитает. Нерациональная вырубка лесных массивов может привести не только к сбоям в экономических системах предприятий, но также катастрофически отразиться на здоровье людей, которые проживают на этих территориях. В связи с этим целью данной статьи является формализация системы взаимодействия объектов лесной отрасли, которая в свою очередь позволит создать эффективную и рациональную модель лесозаготовки на уровне отдельно взятого территориального субъекта. Разработанные авторами взаимосвязи могут быть использованы для системы имитационного моделирования, базирующегося на одном из активно-развивающихся подходов – агентном моделировании. Для решения изложенной проблемы использовались такие общенаучные методы как обобщение, систематизация, индукционно-дедукционные логические заключения, анализ, метод научного синтеза и др. Для определения конкретных числовых характеристик моделируемых объектов, их параметров и переменных, применялись методы и инструменты математической статистики, апробированные на данных региональной статистики лесной отрасли Вологодской области. Полученные результаты будут полезны для формирования компьютерных моделей лесопользования на уровне региона, которые в свою очередь позволят рассчитать оптимальное количество участников для данного народно-хозяйственного направления, а также покажут с какой динамикой лесной массив будет восстанавливаться после вырубки. Проведенная авторами исследования работа может быть интересна различным специалистам исполнительных органов власти, занимающимися регулированием законов и прав в лесной сфере; коммерческим предприятиям, пытающимся рационализировать свою деятельность, при этом извлекая из неё максимальную экономическую отдачу, результативность и нанося минимальный ущерб экологической и окружающей среде; а также предметным специалистам, работающим в направлении моделирования эффективных имитационных систем.

Ключевые слова: агент-ориентированное моделирование, региональный лесной комплекс, лесозаготовка, лесовосстановление, аренда лесных участков

Ссылка при цитировании: Дианов С.В., Алферьев Д.А., Родионов Д.Г. Формализация задачи создания пространственной агент-ориентированной модели для отрасли лесного хозяйства // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Экономические науки. 2021. Т. 14, № 3. С. 113–124. DOI: 10.18721/JE.14309

Это статья открытого доступа, распространяемая по лицензии CC BY-NC 4.0 (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

FORMALIZATION OF THE PROBLEM OF CREATION OF A REGIONAL AGENT-ORIENTED FOREST MANAGEMENT MODEL

S.V. Dianov¹, A.D. Alfer'yev¹, D.G. Rodionov²

¹ Vologda Research Center of the Russian Academy of Sciences,
Vologda, Russian Federation;

² Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University,
St. Petersburg, Russian Federation

The forest resource is an important economic source of advantages for the northwestern regions of Russia. Trees and products obtained during their processing are used in many spheres of human life: furniture, household items and interiors, construction, chemistry, etc. Forests as such are also significant ecosystems that are a necessary element in the formation of safe living conditions for humans (processing carbon dioxide into oxygen), as well as flora and fauna that live in it. Irrational deforestation can lead not only to failures in the economic systems of enterprises, but also have a catastrophic effect on the health of people who live in these territories. In this regard, the purpose of this article is to formalize the system of interaction between objects of the forestry industry, which in turn will make it possible to create an effective and rational model of logging at the level of a separate territorial entity. The relationships developed by the authors can be incorporated into the systems of simulation modeling based on one of the actively developing approaches: the agent-based modeling. To solve the above problem, such general scientific methods were used as generalization, systematization, induction-deductive logical conclusions, analysis, synthesis, etc. To determine the specific numerical characteristics of the simulated objects, their parameters and variables, the authors used methods and tools of mathematical statistics tested on the data of regional timber industry statistics of the Vologda region. The results obtained will be useful for the formation of computer models of forest management at the regional level, which, in turn, will allow calculating the optimal number of participants for a given national economic direction, and also show the dynamics of the forest area recovery after logging. The work done may be of interest to the administrative and managerial structures involved in the regulation of laws and rights in the forestry sector; commercial enterprises trying to rationalize their activities, while extracting the maximum economic return from it and causing minimal damage to the ecological environment; as well as subject specialists working in the direction of modeling effective simulation systems.

Keywords: agent-oriented modeling, regional forestry complex, logging, reforestation, lease of forest areas

Citation: S.V. Dianov, A.D. Alfer'yev, D.G. Rodionov, Formalization of the problem of creation of a regional agent-oriented forest management model, St. Petersburg State Polytechnical University Journal. Economics, 14 (3) (2021) 113–124. DOI: 10.18721/JE.14309

This is an open access article under the CC BY-NC 4.0 license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

Введение

Эффективное лесопользование имеет важное социально-экономическое и экологическое значение как в локальном, так и в глобальном масштабах. Принятие непродуманных, не имеющих значимой аргументации решений в сфере управления лесным хозяйством, может привести к неблагоприятным последствиям для окружающей среды, ухудшению социальной обстановки и потере потенциальной экономической выгоды от использования лесных ресурсов [1–4].

Важность решения задачи эффективного лесопользования подчеркивается в инициативах «Стратегии развития лесного комплекса Российской Федерации до 2030 года», где в рамках совершенствования системы управления лесами определена необходимость развития системы стратегического и текущего лесного планирования разных уровней. Для реализации такой возможности необходимо иметь комплексные модели лесной отрасли на различных уровнях государственного управления.

В соответствии с Лесным кодексом Российской Федерации, утвержденным Федеральным законом от 4 декабря 2006 г. № 200-ФЗ, полномочия в области лесных отношений распределены между органами государственной власти Российской Федерации, органами исполнительной государственной власти субъектов и органами местного самоуправления. Причем основные полномочия по управлению лесами переданы на уровень регионального управления. В их числе: организация использования лесов, их охрана, защита, воспроизводство, предоставление лесных участков в пользование, аренда, организация и проведение соответствующих аукционов, заключение договоров [6]. Аренда в лесном праве призвана решить две задачи: заготовка древесины и других видов лесопользования; ведение лесного хозяйства в процессе лесопользования (лесовосстановление и другие лесохозяйственные мероприятия при надлежащем использовании земель, на которых произрастают леса) [7]. Государство должно формировать систему аренды лесов таким образом, чтобы в результате работы арендаторов обеспечивался долгосрочный значимый социально-экономический эффект и при этом не нарушалась экология. При этом актуальной задачей является обеспечение поддержки принятия решений с использованием имитационных моделей.

В связи с этим особую актуальность приобретает задача построения агент-ориентированной модели регионального лесного комплекса, функциональной и поведенческой составляющей агентов, а также определение взаимосвязей между агентами и средой модели.

Одним из эффективных способов моделирование сложных систем в настоящее время является агент-ориентированное моделирование. Его отличительная особенность — использование в качестве основных элементов программных агентов, имеющих индивидуальное поведение. С помощью агент-ориентированного моделирования исследуемую макроэкономическую систему можно представить в виде совокупности процессов на микроуровне и управляющих воздействий на макроуровне. При этом решения агентами систем различного уровня принимаются с учетом их ограниченной рациональности. В результате, при изучении экономических процессов на микроуровне, можно достаточно точно оценить эффективность управляющих воздействий на макроуровне, например, со стороны органов государственной власти [8]. В настоящее время спектр исследований по применению агент-ориентированного моделирования в лесном хозяйстве достаточно широк [9–18].

С точки зрения теории систем, лесной комплекс можно определить как открытую, сложную динамическую систему [9]. На ее верхнем уровне можно выделить следующие основные системы: экологическая система, социальная система, производственно-экономическая система, система государственного управления, внешняя среда. Каждая из этих систем имеет представление в виде определенного набора компонентов, которые наделены характеризующими их свойствами. Часть из этих компонентов являются активными (агентами). Они, преследуя свои цели, могут взаимодействовать между собой и изменять свойства доступных им компонентов. Через поведение агентов формируются внутрисистемные и межсистемные связи.

При построении модели лесозаготовки формализации подверглись элементы двух систем: экологической и производственно-экономической. В контексте функционирования регионального лесного комплекса экосистема выступает в роли поставщика первичных ресурсов для всех остальных систем. В этом смысле ее модель можно считать центральным элементом общей модели, в которой все остальные элементы тем или иным образом взаимодействуют с ней (используют, сохраняют, восстанавливают ресурсы). Экосистема связана с определенной лесной территорией. Производственно-экономическая система представляется множеством разнообразных лесозаготовительных предприятий (арендаторов лесных участков). Они потребляют ресурсы экосистемы, и при этом изменяют ее. Основная цель их деятельности — получение максимальной прибыли.

Цель исследования

Целью данной статьи является формализация системы взаимодействия объектов лесной отрасли, которая в свою очередь позволит создать эффективную и рациональную модель лесозаготовки на уровне отдельно взятого территориального субъекта.

Методы исследования

В качестве методов исследования используются методы агент-ориентированного моделирования. Представим формализацию решаемой задачи.

Концептуальная формализация предметной области лесозаготовки

Имеется некоторая лесная территория (T), состоящая из определенного количества (N) лесных участков (LU).

Лесной участок имеет определенную площадь (S), определенный объем обезличенной (без породного состава – агрегированный показатель) древесной массы на гектар площади (M), идентификатор на уровне территории (ID) – коэффициент доступности $k^d : LU(ID; S; M; k^d)$.

Общая площадь лесной территории:

$$S(T) = \sum_{ID=1}^N GET(S; LU(ID)).$$

В целях использования лесного участка для лесозаготовки может быть заключен договор аренды:

$$DA(ID; LU(ID); A(ID); AP; Y_s; Y_f),$$

где ID – идентификатор договора аренды; $A(ID)$ – арендатор с идентификатором ID , с которым заключен договор; AP – ежегодная арендная плата; Y_s – год начала договора аренды; Y_f – год окончания договора аренды.

Каждый год ($YEAR$) на лесном участке осуществляются вырубki на определенной площади $S^-(LU(ID); YEAR)$. В результате уменьшается площадь возможной лесосеки участка (S^r). За период в K лет:

$$S^r(K) = S - \sum_{YEAR=1}^K (S^-(YEAR)).$$

Вырубаемая площадь зависит от возможностей арендатора лесного участка и от установленных на государственном уровне характеристик возобновления лесных ресурсов. Характеристики возобновления определяются исходя из специфики конкретного участка как максимальная площадь, которая может подлежать рубке в пределах одного года – $S_{\max}^-(LU(ID))$. В случае превышения или занижения данного показателя арендатору грозят штрафные санкции:

$$PN(ID; DA(ID); YEAR; Pn^S),$$

где ID – идентификатор штрафа; $YEAR$ – год наложения штрафа; Pn^S – сумма штрафа.

Возможности арендатора можно определять на уровне его крупности (R) в зависимости от ежегодного объема заготовки древесины:

$$R = \{sb; b; m; s\},$$

где sb – очень крупные арендаторы (более 500 тыс. м³); b – крупные арендаторы (от 100 до 500 тыс. м³); m – средние арендаторы (от 20 до 100 тыс. м³); s – мелкие арендаторы (менее 20 тыс. м³).

Способность арендатора за год вырубать определенную площадь лесного участка определяется путем генерации случайной величины на основе функций нормального закона распределения, определенных для каждого типа арендатора:

$$S_{\max}^{-}(A(ID)) = rand\left(GET(R; A(ID)); \{p_{sb}^a(s); p_b^a(s); p_m^a(s); p_s^a(s)\} \right),$$

где $p_{sb}^a(s)$ – функция нормального распределения максимально возможной площади вырубki для очень крупных арендаторов; $p_b^a(s)$ – функция нормального распределения максимально возможной площади вырубki для крупных арендаторов; $p_m^a(s)$ – функция нормального распределения максимально возможной площади вырубki для средних арендаторов; $p_s^a(s)$ – функция нормального распределения максимально возможной площади вырубki для мелких арендаторов.

Следует учитывать, что данный показатель рассчитывается применительно ко всем участкам арендатора (распределяется по ним). Общая вырубаемая площадь конкретным арендаторам по всем арендуемым им участкам определяется:

$$S_{LU}^{-}(A(ID)) = \sum S_{\max}^{-}\left(GET(LU(ID); DA(A(ID))) \right).$$

Вырубаемая площадь в текущем году на конкретном участке определяется следующим образом:

$$\left\{ \begin{array}{l} (S_{LU}^{-}(A(ID)) \leq S_{\max}^{-}(A(ID))); S^{-}(LU(ID); YEAR) = S_{\max}^{-}(LU(ID)), \\ (S_{LU}^{-}(A(ID)) > S_{\max}^{-}(A(ID))); S^{-}(LU(ID); YEAR) = \frac{S_{LU}^{-}(A(ID))}{S_{\max}^{-}(A(ID))} \times S_{\max}^{-}(LU(ID)). \end{array} \right.$$

По результатам вырубki на определенном лесном участке арендатор получает прибыль. Она зависит от средней стоимости кубического метра древесины (P^t), затрат на заготовку (Z^z), арендной платы и штрафов:

$$\begin{aligned} & P(DA(ID); YEAR) = \\ & = P^t \times GET(M; GET(LU(ID)); DA(ID)) \times S^{-}(GET(LU(ID); DA(ID)); YEAR) - \\ & - Z^z(GET(LU(ID); DA(ID))) \times S^{-}(GET(LU(ID); DA(ID)); YEAR) - \\ & - GET(AP; DA(ID)) - GET(Pn^s; PN(DA(ID); YEAR)). \end{aligned}$$

Затраты на заготовку определяются для единицы площади (га) и зависят от доступности лесного участка. Для учета доступности используется коэффициент доступности k^d , определенный для каждого участка. Увеличение затрат на заготовку со снижением доступности лесного участка имеет некоторую функциональную зависимость f^{zd} . Общие затраты определяются следующим образом:

$$Z^z(LU(ID)) = f^{zd}\left(GET(k^d; LU(ID)); Z^z \right).$$

Общая прибыль арендатора за период $YEARS$ лет определяется:

$$P(DA(ID); YEARS) = \sum_{YEAR=1}^{YEARS} P(DA(ID); YEAR).$$

На лесном участке происходит постоянный процесс естественного изменения объемов древесной массы на невырубленных участках M^+ . Его прогнозируемая величина функционально зависит от текущего объема древесной массы:

$$M^+(YEAR) = f_{im}^{pr}(M(YEAR - 1)),$$

где f_{im}^{pr} – функция прироста древесной массы.

За количество лет K объем древесной массы на 1 га участка можно рассчитать следующим образом:

$$M = M(YEAR - 1) + \sum_{YEAR=1}^K M^+(YEAR).$$

Арендаторам разрешается рубить лес только на тех участках, где превышена установленная норма объема древесной массы на 1 га M^N . В противном случае им грозят штрафные санкции.

Исходя из формального описания, на концептуальном уровне региональной агент-ориентированной модели лесозаготовки определены два типа агентов: агент участок и агент арендатор. Агент участок предназначен для обеспечения формирования оценочных характеристик лесного участка в течение модельного времени. Агент арендатор участвует в процедурах по заключению договора аренды участка и осуществляет его использования. Модели поведения представленных агентов описаны в работе [1].

Результаты и обсуждение

Прогнозирование динамики изменения элементов модели

При создании модели необходимо учитывать динамику процессов формирования элементов среды аренды лесных участков в рассматриваемом регионе Российской Федерации. Авторы статьи провели анализ динамики развития системы аренды лесных участков на территории Вологодской области, которая занимает одно из ведущих мест среди субъектов России по наличию лесосырьевых ресурсов. На основе имеющихся ретроспективных данных были получены зависимости, с использованием которых в краткосрочной перспективе обеспечивается возможность прогнозировать изменение количества и площади арендуемых участков, количества арендаторов, срока аренды.

Аналізу подверглись два основных элемента системы аренды: лесные участки переданные в аренду (договоры аренды) и арендаторы. Изучались характеристики формирования параметров данных элементов и динамика их развития во времени. Авторы ориентировались на общедоступные источники информации, содержащие в основном сведения Департамента лесного комплекса Вологодской области и Портала открытых данных Вологодской области. Общей целью анализа динамики договоров аренды являлось определение трендов развития количества и площади арендуемых участков, а также продолжительности аренды [20]. Это позволит в дальнейшем осуществлять моделирование процессов изменения их общей структуры.

Динамика временных рядов соотношения количества участков по договорам аренды для целей лесозаготовки представлена на рисунке далее (рис. 1). Исходя из представленного графического отображения зависимости можно говорить о ее линейном характере. С использованием

инструментария линейной аппроксимации программного обеспечения Microsoft Excel получена следующая функция изменения тренда количества договоров аренды с целью лесозаготовки: $\hat{y} = 9.9x - 19455$. Величина достоверности аппроксимации $R^2 = 0.6103$.

Диаграмма изменения площади участков по договорам аренды на цели лесозаготовки представлена далее (рис. 2).

Уравнение зависимости, полученное путем линейной аппроксимации: $\hat{y} = 227537x - 5 \cdot 10^8$. Величина достоверности аппроксимации $R^2 = 0.9048$.

Гистограмма распределения продолжительности аренды представлена на рис. 3 (рис. 3).

Она показывает значительное преобладание договоров аренды с продолжительностью более сорока лет. В данном случае сложно подобрать закон распределения, поэтому для целей моделирования при формировании длительности аренды по договору целесообразно использовать дискретное распределение вероятности. При этом для определения интервалов и значений вероятностей используется представленная гистограмма с учетом того, что в действующем законодательстве диапазон возможного срока аренды лесного участка ограничен 10–49 годами.

Общей целью анализа состава арендаторов лесных участков являлось определение динамики изменения их количественного состава с учетом производственных возможностей. Арендаторы с разными возможностями отличаются моделями поведения. Поэтому при проведении анализа арендаторы были разбиты на четыре группы в зависимости от ежегодного объема заготовки древесины в соответствии с представленной выше формальной моделью. Можно принять, что поведение каждого арендатора в определенных ситуациях будет схоже с поведением любого другого арендатора, принадлежащего к данной группе. Соотношения количества арендаторов и количества арендованных ими участков в разрезе групп в динамике 2016–2018 гг. представлено на рис. 4 (рис. 4). Показательно, что при практически неизменном количественном составе очень крупных и крупных арендаторов растет соотношение количества арендуемых ими участков за счет уменьшения доли количества арендуемых участков мелкими арендаторами.

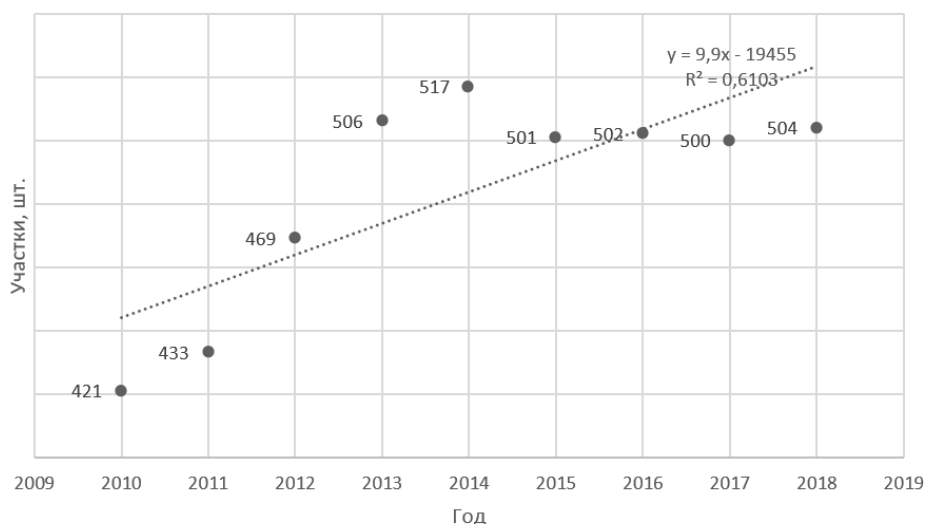


Рис. 1. Изменение количества участков по договорам аренды на цели лесозаготовки¹

Fig. 1. Change in the number of plots under lease agreements for harvesting purposes¹

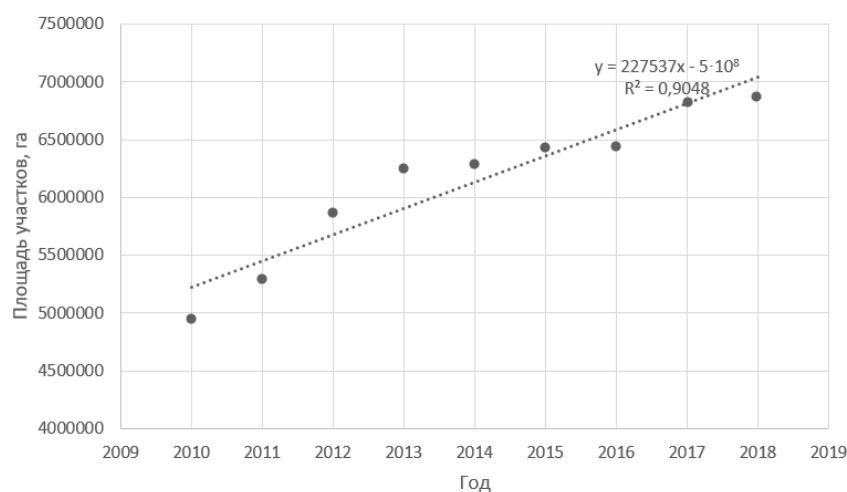


Рис. 2. Изменение площади участков по договорам аренды на цели лесозаготовки¹
 Fig. 2. Change in the area of land plots under lease agreements for the purpose of logging¹

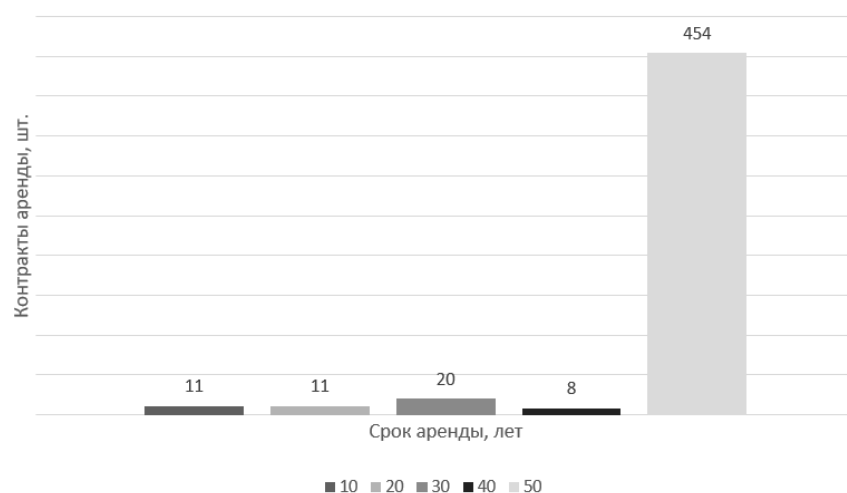


Рис. 3. Гистограмма распределения продолжительности аренды лесных участков в Вологодской области¹
 Fig. 3. Histogram of the distribution of the duration of the lease of forest areas in the Vologda Oblast¹

Временные ряды количества арендаторов лесных участков в Вологодской области в разрезе групп за 2011-2018 гг. представлены на рис. 5 (рис. 5).

С использованием инструментария линейной аппроксимации программного обеспечения Microsoft Excel для каждой группы были получены функции тренда изменения временного ряда количества арендаторов:

- Очень крупные: $\hat{y} = 0.3214x + 0.1786$; $R^2 = 0.7386$;
- Крупные: $\hat{y} = 1.4286x + 20.821$; $R^2 = 0.6058$;
- Средние: $\hat{y} = 5.369x + 49.714$; $R^2 = 0.9043$;
- Мелкие: $\hat{y} = -6.4881x + 235.32$; $R^2 = 0.7724$.

Очевидно, что полученные функциональные зависимости имеют временные ограничения. Но при этом вполне могут быть использованы для краткосрочных и среднесрочных прогнозов. К то-

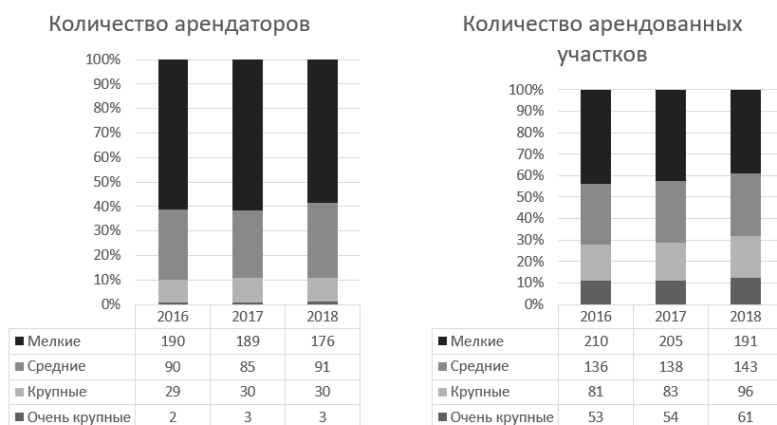


Рис. 4. Соотношения количества арендаторов и количества арендованных ими участков в разрезе групп¹
 Fig. 4. Ratios between the number of tenants and the number of plots leased by them by group¹

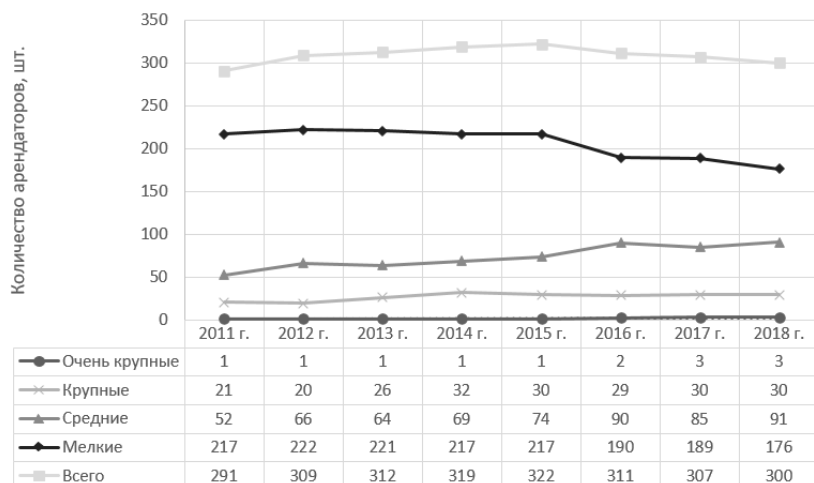


Рис. 5. Временные ряды количества арендаторов лесных участков в Вологодской области
 Fig. 5. Time series of the number of lessees of forest plots in the Vologda Oblast

му же, при разработке интенциональной модели, можно изменять ее параметры при поступлении новых данных о текущем развитии моделируемой системы.

Заключение

Динамика развития системы аренды лесных участков зависит от множества различных факторов. Определение их полного перечня и характера воздействия на систему представляется сложной задачей, которая не имеет на сегодняшний день решения. Представленные в статье подходы позволяют дать количественную оценку тенденции динамики развития основных элементов системы аренды лесных участков, а также осуществить прогноз значений их параметров в будущих периодах.

Выполненная работа вносит вклад в развитие теоретических подходов к разработке методологии исследования динамики формирования институциональной среды аренды лесных участков в регионе Российской Федерации и прикладных аспектов ее моделирования. Практическая значимость работы заключается в обеспечении возможности определять основные тенденции раз-

вития элементов системы аренды лесных участков, строить прогнозы их развития, использовать результаты при построении различных моделей лесного комплекса.

С использованием разработанных подходов появляется возможность более адекватно описывать происходящие процессы за счет формирования динамики изменения элементов модели. Это в полной мере может относиться и к другим моделям регионального лесного комплекса, так как рассматриваемые элементы относятся к разряду базовых в данной предметной области.

Направления дальнейших исследований

С использованием подходов, разработанных авторами, открываются новые возможности для дальнейших исследований в отрасли лесного хозяйства. Построенная модель позволяет более адекватно описывать происходящие процессы за счет формирования динамики изменения элементов модели, в связи с чем можно применять эти модели к другим структурам регионального лесного комплекса, так как рассматриваемые элементы являются базовыми в данной предметной области.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Дианов С.В., Ригин В.А., Колосов А.В.** Агент-ориентированная модель аренды лесных участков для целей лесозаготовки в Сокольском лесничестве Вологодской области // Вопросы территориального развития. 2020. Т. 8. № 1. DOI: 10.15838/tdi.2020.1.51
2. **Петров В.Н., Каткова Т.Е., Карвинен С.** Тенденции развития лесной экономики в России и Финляндии // Экономические и социальные перемены: факты, тенденции, прогноз. 2019. Т. 12. № 3. С. 140–157. DOI: 10.15838/esc.2019.3.63.9
3. **Печаткин В.В.** Эволюция лесопользования и лесовосстановления в России: мифы и реальность // Экономические и социальные перемены: факты, тенденции, прогноз. 2013. № 2 (26). С. 161–170. URL: <http://esc.vscs.ac.ru/article/406>
4. **Селименков Р.Ю., Советов П.М.** Лесной комплекс: управление инновационным развитием. Вологда: ИСЭРТ РАН, 2012. 215 с.
5. **Хашир Б.О., Хот К.П.** Концепция стратегии инновационного развития лесного комплекса // Вестник Адыгейского государственного университета. Серия 5: Экономика. 2012. № 4 (111). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/kontseptsiya-strategii-innovatsionnogo-razvitiya-lesnogo-kompleksa>
6. **Баяндина Е.Д., Каменев А.Л.** Государственное управление лесами на уровне региона: возможности и ограничения // Вопросы государственного и муниципального управления. 2011. № 2. С. 192–204. URL: <https://vgmu.hse.ru/2011--2/33743672.html>
7. **Конокотин Д.Н.** Аренда лесного участка в Российской Федерации // Имущественные отношения в Российской Федерации. 2011. № 8 (119). С. 74–79.
8. **Машкова А.Л.** Прогнозирование долгосрочного развития макроэкономических систем на базе агент-ориентированных моделей // Государственное управление. 2016. № 57. С. 49–68. URL: http://e-journal.spa.msu.ru/vestnik/item/57_2016mashkova.htm
9. **Блам Ю.Ш.** Агентно-ориентированный подход к реализации модели лесного комплекса региона // Вестник КузГТУ. 2014. № 4. С. 176–180. URL: <https://vestnik.kuzstu.ru/index.php?page=article&id=2716>
10. **Гулин К.А., Антонов М.Б.** Теоретические аспекты агент-ориентированного моделирования развития лесного комплекса // Экономические и социальные перемены: факты, тенденции, прогноз. 2017. Т. 10. № 6. С. 59–74. DOI: 10.15838/esc.2017.6.54.4
11. **Резанов В.К., Чепуров Е.П., Журавлев Е.Г.** Принципиальный подход к оценке рисковей нагрузки устойчивого развития лесного комплекса // Власть и управление на Востоке России. 2016. № 4 (77). URL: [http://vlastdviu.ru/index.php?page=rio4-2016\(4-77\)&rc=rio](http://vlastdviu.ru/index.php?page=rio4-2016(4-77)&rc=rio)
12. **Яровой С.В.** Агентный подход при моделировании лесопожарных ситуаций // Программные продукты и системы. 2016. № 3. С. 101–108. DOI: 10.15827/0236-235X.115.101-108
13. **Henderson J.D., Abt R.C.** An Agent-Based Model of Heterogeneous Forest Landowner Decision-making. Forest Science, 2016, vol. 62, iss. 4, pp. 364–376. DOI: 10.5849/forsci.15-018

14. **Huff E.S., Leahy J.E., Hiebeler D. et al.** An Agent-Based Model of Private Woodland Owner Management Behavior Using Social Interactions, Information Flow, and Peer-To-Peer Networks. *PLoS ONE*, 2015, no. 10 (11). DOI: 10.1371/journal.pone.0142453
15. **Kamimura K., Gardiner B., Dupont S. et al.** Agent-based modelling of wind damage processes and patterns in forests. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2019, vol. 268, pp. 279–288. DOI: 10.1016/j.agrformet.2019.01.020
16. **Leahy J.E., Reeves E.G., Bell K.P. et al.** Agent-Based Modeling of Harvest Decisions by Small Scale Forest Landowners in Maine, USA. *International Journal of Forestry Research*, 2013. DOI: 10.1155/2013/563068
17. **Troitzsch K.G.** Agentenbasierte Modellierung von Märkten. *Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen*, 2012, vol. 163 (10), pp. 408–416. DOI: 10.3188/szf.2012.0408
18. **Zupko R., Rouleau M.** ForestSim: Spatially explicit agent-based modeling of non-industrial forest owner policies, 2019, vol. 9, pp. 117–125. DOI: 10.1016/j.softx.2019.01.008
19. **Латыпова Л.В.** Формирование методического подхода (модели) рационального размещения предприятий лесной промышленности // *Экономические науки*. 2009. № 12 (61). С. 437–441. URL: <https://ecsn.ru/articles/index/200912>
20. **Алферьев Д.А., Родионов Д.Г.** Моделирование сценариев динамики индикаторов ИТ-отрасли посредством элементарных математических функций // *Экономика. Информатика*. 2020. Т. 47. № 4. С. 729–746. DOI 10.18413/2687-0932-2020-47-4-729-746

REFERENCES

1. **S.V. Dianov, V.A. Rigin, A.V. Kolosov**, Agent-orientirovannaya model arendy lesnykh uchastkov dlya tseley lesozagotovki v Sokolskom lesnichestve Vologodskoy oblasti // *Voprosy territorialnogo razvitiya*. 2020. Т. 8. № 1. DOI: 10.15838/tdi.2020.1.51
2. **V.N. Petrov, T.Ye. Katkova, S. Karvinen**, Tendentsii razvitiya lesnoy ekonomiki v Rossii i Finlyandii // *Ekonomicheskiye i sotsialnyye peremeny: fakty, tendentsii, prognoz*. 2019. Т. 12. №. 3. С. 140–157. DOI: 10.15838/esc.2019.3.63.9
3. **V.V. Pechatkin**, Evolyutsiya lesopolzovaniya i lesovosstanovleniya v Rossii: mify i realnost // *Ekonomicheskiye i sotsialnyye peremeny: fakty, tendentsii, prognoz*. 2013. № 2 (26). С. 161–170. URL: <http://esc.vsc.ac.ru/article/406>
4. **R.Yu. Selimenkov, P.M. Sovetov**, Lesnoy kompleks: upravleniye innovatsionnym razvitiyem. Vologda: ISERT RAN, 2012. 215 s.
5. **B.O. Khashir, K.P. Khot**, Kontseptsiya strategii innovatsionnogo razvitiya lesnogo kompleksa // *Vestnik Adygeyskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya 5: Ekonomika*. 2012. № 4 (111). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/kontseptsiya-strategii-innovatsionnogo-razvitiya-lesnogo-kompleksa>
6. **Ye.D. Bayandina, A.L. Kamenev**, Gosudarstvennoye upravleniye lesami na urovne regiona: vozmozhnosti i ogranicheniya // *Voprosy gosudarstvennogo i munitsipalnogo upravleniya*. 2011. № 2. С. 192–204. URL: <https://vgmu.hse.ru/2011--2/33743672.html>
7. **D.N. Konokotin**, Arenda lesnogo uchastka v Rossiyskoy Federatsii // *Imushchestvennyye otnosheniya v Rossiyskoy Federatsii*. 2011. № 8 (119). С. 74–79.
8. **A.L. Mashkova**, Prognozirovaniye dolgosrochnogo razvitiya makroekonomicheskikh sistem na baze agent-orientirovannykh modeley // *Gosudarstvennoye upravleniye*. 2016. № 57. С. 49–68. URL: http://e-journal.spa.msu.ru/vestnik/item/57_2016mashkova.htm
9. **Yu.Sh. Blam**, Agentno-orientirovanny podkhod k realizatsii modeli lesnogo kompleksa regiona // *Vestnik KuzGTU*. 2014. № 4. С. 176–180. URL: <https://vestnik.kuzstu.ru/index.php?page=article&id=2716>
10. **K.A. Gulin, M.B. Antonov**, Teoreticheskiye aspekty agent-orientirovannogo modelirovaniya razvitiya lesnogo kompleksa // *Ekonomicheskiye i sotsialnyye peremeny: fakty, tendentsii, prognoz*. 2017. Т. 10. № 6. С. 59–74. DOI: 10.15838/esc.2017.6.54.4
11. **V.K. Rezanov, Ye.P. Chepurov, Ye.G. Zhuravlev**, Printsipialnyy podkhod k otsenke riskovoy nagruzki ustoychivogo razvitiya lesnogo kompleksa // *Vlast i upravleniye na Vostoke Rossii*. 2016. № 4 (77). URL: [http://vlastdviu.ru/index.php?page=rio4-2016\(4-77\)&rc=rio](http://vlastdviu.ru/index.php?page=rio4-2016(4-77)&rc=rio)

12. **S.V. Yarovoy**, Agentnyy podkhod pri modelirovaniy lesopozharnykh situatsiy // Programmnyye produkty i sistemy. 2016. № 3. S. 101–108. DOI: 10.15827/0236-235X.115.101-108
13. **J.D. Henderson, R.C. Abt**, An Agent-Based Model of Heterogeneous Forest Landowner Decision-making. Forest Science, 2016, vol. 62, iss. 4, pp. 364–376. DOI: 10.5849/forsci.15-018
14. **E.S. Huff, J.E. Leahy, D. Hiebeler et al.**, An Agent-Based Model of Private Woodland Owner Management Behavior Using Social Interactions, Information Flow, and Peer-To-Peer Networks. PLoS ONE, 2015, no. 10 (11). DOI: 10.1371/journal.pone.0142453
15. **K. Kamimura, B. Gardiner, S. Dupont et al.**, Agent-based modelling of wind damage processes and patterns in forests. Agricultural and Forest Meteorology, 2019, vol. 268, pp. 279–288. DOI: 10.1016/j.agrformet.2019.01.020
16. **J.E. Leahy, E.G. Reeves, K.P. Bell et al.**, Agent-Based Modeling of Harvest Decisions by Small Scale Forest Landowners in Maine, USA. International Journal of Forestry Research, 2013. DOI: 10.1155/2013/563068
17. **K.G. Troitzsch**, Agentenbasierte Modellierung von Märkten. Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen, 2012, vol. 163 (10), pp. 408–416. DOI: 10.3188/szf.2012.0408
18. **R. Zupko, M. Rouleau**, ForestSim: Spatially explicit agent-based modeling of non-industrial forest owner policies, 2019, vol. 9, pp. 117–125. DOI: 10.1016/j.softx.2019.01.008
19. **L.V. Latypova**, Formirovaniye metodicheskogo podkhoda (modeli) ratsionalnogo razmeshcheniya predpriyatiy lesnoy promyshlennosti // Ekonomicheskiye nauki. 2009. № 12 (61). S. 437–441. URL: <https://ecsn.ru/articles/index/200912>
20. **D.A. Alferyev, D.G. Rodionov**, Modelirovaniye stsenariyev dinamiki indikatorov IT-otrasli posredstvom elementarnykh matematicheskikh funktsiy // Ekonomika. Informatika. 2020. T. 47. № 4. S. 729–746. DOI 10.18413/2687-0932-2020-47-4-729-746

Статья поступила в редакцию 08.05.2021.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ / THE AUTHORS

ДИАНОВ Сергей Владимирович

E-mail: dianov.sv@mail.ru

DIANOV Sergey V.

E-mail: dianov.sv@mail.ru

АЛФЕРЬЕВ Дмитрий Александрович

E-mail: alferev_1991@mail.ru

ALFER'YEV Dmitriy A.

E-mail: alferev_1991@mail.ru

РОДИОНОВ Дмитрий Григорьевич

E-mail: drodionov@spbstu.ru

RODIONOV Dmitry G.

E-mail: drodionov@spbstu.ru