

Научная статья
УДК 330.15
EDN MLJQTZ
DOI 10.17150/2500-2759.2024.34(2).331-340



СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ СВОЙСТВ И МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ РОСТА ЭКОНОМИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ РЕГИОНАЛЬНОГО ЛЕСНОГО КОМПЛЕКСА В УСЛОВИЯХ ДЕТЕРМИНИРОВАННОГО ХАОСА

Г.В. Давыдова¹, М.А. Булгакова²

¹ Байкальский государственный университет, г. Иркутск, Российская Федерация

² Академия управления МВД России, г. Москва, Российская Федерация

Информация о статье

Дата поступления
24 сентября 2023 г.

Дата принятия к печати
17 июня 2024 г.

Дата онлайн-размещения
30 июня 2024 г.

Ключевые слова

Свойства; система;
моделирование; лесной
комплекс; детерминированный
хаос; устойчивость

Аннотация

Экономическая система регионального лесного комплекса подошла к порогу качественных изменений, требующих корректировки траектории своего дальнейшего развития. С этой целью в статье выявлен основной недостаток современного подхода к исследованию процессов, происходящих в экономике лесного комплекса, который подтверждается практикой применения прямого экстраполирования прошлого опыта на будущее время (темпы экономического роста, стратегии развития лесного комплекса на перспективу), серьезно ограничивая возможности прогнозирования и упрощая представления об экономической системе, исключая сложность взаимодействия между ее элементами. Подробно представлены основные свойства экономической системы регионального лесного комплекса, которые требуют корректировки с изменением (увеличением) числа степеней свободы у образующих ее элементов. Выделены основные особенности, присущие системе и не позволяющие ее упрощать. В реальной практике динамического моделирования экономических систем наибольшее распространение получили три модели, подробно представленные в статье. Выделены особенности моделей В.В. Леонтьева, рассмотрены некоторые их несовершенства, препятствующие конструктивному использованию в целях прогнозирования эволюции экономической системы регионального лесного комплекса. В целях описания ее динамики авторами предложено нелинейное эталонное уравнение, которое является нелинейным обобщением известного матричного уравнения В.В. Леонтьева путем добавления членов, описывающих изменения экономической системы в пространстве. Данная модель повышает точность прогнозирования развития экономической системы регионального лесного комплекса.

Original article

IMPROVING THE PROPERTIES AND MODELING THE GROWTH DYNAMICS OF THE ECONOMIC SYSTEM OF THE REGIONAL FOREST COMPLEX IN CONDITIONS OF DETERMINISTIC CHAOS

Galina V. Davydova¹, Marina A. Bulgakova²

¹ Baikal State University, Irkutsk, the Russian Federation

² Academy of Management of the Ministry of Internal Affairs of Russia, Moscow, the Russian Federation

Article info

Received
September 24, 2023

Abstract

The economic system of the regional forest complex has reached the threshold of qualitative changes that require adjusting the trajectory of its further development. To this end, the article identifies the main drawback

Accepted
June 17, 2024

Available online
June 30, 2024

Keywords

Properties; system; modeling;
forest complex; deterministic
chaos; stability

Основной недостаток современного подхода к исследованию процессов, происходящих в экономике лесного комплекса, заключается в отсутствии реальной системности в их анализе. Несмотря на то, что экономические проблемы этой сферы достаточно активно обсуждаются в научной литературе и имеют широкий общественный резонанс, ситуация в этой отрасли экономического знания напоминает ту, что возникла в науке в период становления вычислительных экспериментов. Тогда «казалось, что изучение сложной системы аналогично складыванию мозаической картины. Например, при изучении биосферы, одной группе исследователей можно поручить строить модели атмосферы, другой — океана, третьей — биоценоза тундры. Затем эти куски сшиваются в единое целое, и получается прекрасная модель. Провал нескольких крупных проектов показал, что так поступать нельзя» [1, с. 12]. Здесь усматривается прямая аналогия с современными методами исследования экономики лесного комплекса: одна научная группа описывает состояние лесных ресурсов, другая — проблемы заготовки древесины, третья — переработки, четвертая — направления и меры государственного регулирования и т.д. Затем полученные результаты объединяют под названием «Комплексная программа экономического развития отрасли». Такой подход является следствием господства механистических представлений и принципа классического детерминизма в современном экономическом анализе. Неадекватность прогнозов, полученных на основе действующих методик, становится вполне очевидной в настоящее

of the modern approach to the study of processes occurring in the economy of the forest complex, which is confirmed by the practice of applying direct extrapolation of past experience for the future (economic growth rates, strategies for the development of the forest complex for the future), seriously limiting the possibilities of forecasting and simplifying the understanding of the economic system, excluding the complexity of interaction between its elements. The main properties of the economic system of the regional forest complex are presented in detail, which require adjustment with a change (increase) in the number of degrees of freedom of its constituent elements. The main features inherent in the system and not allowing it to be simplified are highlighted. In the real practice of dynamic modeling of economic systems, the three models presented in detail in the article have become the most widespread. The features of the V.V. Leontiev models are highlighted. Some of their imperfections, which prevent constructive use in order to predict the evolution of the economic system of the regional forest complex, are considered. In order to describe its dynamics, the authors proposed a nonlinear reference equation, which is a nonlinear generalization of the well-known matrix equation of V.V. Leontiev by adding terms describing changes in the economic system in space. This model increases the accuracy of forecasting the development of the economic system of the regional forest complex.

время — в эпоху развития теории активных систем, диссипативных структур и детерминированного хаоса, фактически исключающих возможность прямого экстраполирования прошлого опыта на будущее время.

Наиболее полное представление о ситуации и перспективах развития экономики регионального лесного комплекса (РЛК) можно сформировать, если представить его в качестве системы.

По определению система — это совокупность взаимосвязанных причинно-следственных связей элементов, образующих определенную целостность. Противоположностью системы выступает хаос — неорганизованная среда. Характерной особенностью хаоса выступает слабая чувствительность к начальным условиям, а отсюда — невозможность экстраполировать поведение элементов среды [2, с. 42; 3].

Следует отметить, что изучение макроэкономических систем, осуществляемое в рамках самостоятельной дисциплины — теории макросистем, находится на стадии становления. К настоящему времени можно говорить о трех относительно независимых направлениях этой отрасли знания, связанных с исследованием конкретных классов макросистем: термодинамических, экономических (обмен ресурсами) и территориальных (городских, региональных, глобальных).

Представим подробнее основные свойства экономической системы регионального лесного комплекса (ЭСРЛК), что, по нашему мнению, является первоочередной задачей, поскольку именно конкретные свойства системы определяют форму ее

поведения. В свою очередь, форма поведения системы задает тип ее последующей формализации и соответствующий набор инструментов анализа.

Следовательно, можно выделить следующие свойства экономической системы регионального лесного комплекса: самоорганизуемость, целеориентирование, сложность, динамичность, нелинейность, диссипативный характер. Ключевой характеристикой системы является взаимодействие, которое заключается, с одной стороны, во взаимодействии системы с окружающей средой, а с другой — во взаимодействии элементов между собой внутри системы, что, в свою очередь, определяет ее (системы) *целостность*.

Уровень взаимодействия с окружающей средой позволяет характеризовать степень независимости системы от внешних воздействий.

По характеру возникновения ЭСРЛК можно определить как *целеориентированную самоорганизующуюся систему*.

В зависимости от того, как исследователь определяет роль человека в системе, ЭСРЛК — в нашей интерпретации — это *самоорганизующаяся система*. Это чрезвычайное качество системы, поскольку именно оно обуславливает нелинейность ее временной эволюции. Признание этого качества рассматриваемой системы позволяет, наконец, отказаться от линейной традиции в ее анализе. Трактовка ЭСРЛК как искусственной системы, созданной и управляемой человеком-наблюдателем, как раз и утвердила этот подход на долгие годы.

Выделение свойства самоорганизации обусловлено позиционированием исследователем роли человека в системе.

С одной стороны, если исследователь воспринимает человека как субъекта организации системы, который с самого начала ее создает и впоследствии регулирует ее функционирование, то ЭСРЛК можно отнести к разряду искусственных систем, созданных человеком с целью совместного использования лесных ресурсов региона. С этих позиций создание экономической системы РЛК имеет технологическую основу, состоящую в активной созидательной работе человека как субъекта организации системы.

С другой стороны, в случае, когда исследователь рассматривает человека, обладающего сознанием, как неотъемлемый элемент системы (в силу того, что человек является частью живой природы), ЭСРЛК можно охарактеризовать как *самоорганизующуюся*. С этих позиций система РЛК развивается самостоятельно. В качестве причины ее воз-

никновения возникает стремление человека как части природы к обеспечению гомеостаза, т.е. к обеспечению жизнеспособности в результате сложных приспособительных реакций человека.

Признаком самоорганизации ЭСРЛК является самопроизвольное, не связанное с действием внешних организующих полей *регулярное* поведение экономических субъектов, максимизирующих собственную целевую функцию (прибыли — для производителя, полезности — для потребителя).

В настоящее время в условиях достаточно высокого уровня организации общества, с четко определенной иерархией в качестве внешнего организующего поля, можно рассматривать систему законов, действующих в масштабе государства и мирового экономического пространства, ограничивающих произвольное поведение субъектов, занятых в ЭСРЛК. В связи с этим может показаться, что независимость поведения экономических субъектов регионального лесного комплекса от внешнего организующего поля отсутствует.

Однако следует обратить внимание на то обстоятельство, что развитие иерархической структуры организации общества происходит в порядке «от низших форм к высшим». Поведение субъектов экономики, направленное на создание любой организационной структуры, в том числе и регионального лесного комплекса, изначально определено не самоцелью создания структуры, а внутренней необходимостью производства *максимальной выгоды (прибыли или полезности)*. В свою очередь, объединение субъектов экономики в региональный лесной комплекс на основе единой цели определяет их *коллективное поведение*, а следовательно, упорядочение и самоорганизацию экономической системы РЛК.

Следовательно, экономическая система РЛК возникла в ходе временной эволюции в первоначально однородном экономическом пространстве как *упорядоченная структура*. Упорядоченность ЭСРЛК проявляется двояко:

в виде ее пространственной структуры (как часть экономического пространства воспроизводит его структурные уровни, в нашем случае — секторы бизнеса, сектор домашних хозяйств, общественный сектор). Данное положение следует понимать так: каждый макроэкономический субъект (индивидуум), занятый в сфере регионального лесного комплекса, *одновременно* является и участником сферы бизнеса, и членом домашнего хозяйства, и производителем, и потребителем общественных благ (бюджета);

в волновом характере ее поведения (нелинейном). Самоорганизованность системы предопределяет ее целевую ориентацию, т.е. ЭСРЛК можно определить как *целеориентированную систему*.

Следует отметить, что цели системы регионального лесного комплекса в целом отличны от целей ее элементов. Цели системы определяют порядок взаимодействия подсистем. В случае, если цель системы будет подменена целью какого-либо ее элемента, структурная целостность системы нарушится и произойдет ее разрушение [4].

В связи с тем, что ЭСРЛК является целеориентированной, ее можно определить как *рефлексную*, т.е. систему с обратными связями, реагирующую на изменение условий существования. Наличие обратных связей в этой системе выражается в том, что, с одной стороны, все субъекты экономики, объединенные в систему, участвуют в формировании регионального продукта, который обуславливает величину бюджета региона, а следовательно, определяет объем производства и потребления общественных благ. С другой стороны, бюджет выступает в качестве инструмента воздействия на процесс производства регионального продукта лесного комплекса в последующий период.

В режиме реального наблюдения рефлексный характер ЭСРЛК проявляется в следующем. Любой субъект экономики, осуществляя свою деятельность в любой из сфер, создавая какой-либо продукт или оказывая услуги, в результате налоговых отчислений формирует бюджет региона. Величина бюджета находится в прямой зависимости от эффективности работы субъектов экономики. Бюджет, в свою очередь, предназначен для производства общественных благ, наличие которых выступает необходимым условием существования каждого субъекта региона. Вместе с тем эффективное распределение бюджетных средств способствует расширенному воспроизводству регионального продукта любой отрасли (в том числе лесного комплекса), которое становится основой роста бюджетных поступлений и т.д.

Рефлексный характер ЭСРЛК, в свою очередь, определен тем, что она является *активной*. В отличие от пассивных систем, элементы активной системы обладают собственными интересами и предпочтениями и имеют свободу целенаправленного выбора своего состояния. Результаты целенаправленного выбора, осуществляемого элементами системы, в конечном итоге определяют состояние системы в целом.

Активными элементами ЭСРЛК выступают субъекты экономики, прогнозирующие изменение своего состояния в зависимости от условий и результатов деятельности, осуществляющие целенаправленный выбор форм и способов деятельности.

Таким образом, мы склонны считать, что экономическая система регионального лесного комплекса включает в себе генетическую двойственность: с одной стороны, она может быть рассмотрена как искусственная система, с другой стороны, есть основание считать ее системой с элементами самоорганизации. Исходя из цели нашего исследования, интерес представляет именно второй подход к восприятию регионального лесного комплекса, который до настоящего времени не был реализован в полной мере, а следовательно, не был реализован и математический аппарат для его описания.

Представление ЭСРЛК как сложной самоорганизующейся системы позволяет применить к ее описанию аппарат анализа *коллективных явлений*, в частности, *анализа поведения нелинейных неравновесных систем, развивающихся по динамическим и волновым закономерностям* [5].

Следует отметить, что необходимым условием возникновения коллективных эффектов в системе является ее сложность. По структуре и по форме поведения экономическая система регионального лесного комплекса является *сложной*. По характеру функционирования ЭСРЛК является *динамической*. Динамика ЭСРЛК проявляется в закономерном, направленном изменении во времени ее состояния, происходящем в результате внутренних и внешних воздействий. Одним из факторов, определяющих состояние этой системы, является время. С одной стороны, текущее состояние ЭСРЛК зависит не только от текущих, но и от более ранних значений параметров, его определяющих. С другой стороны, достигнутое состояние системы, в силу ее рефлексного характера, оказывает влияние на условия деятельности субъектов экономики регионального лесного комплекса и выступает условием последующих изменений в системе.

Итак, если состояние данной ЭСРЛК характеризуется совокупностью параметров $s_1, s_2, s_3 \dots s_n$, и каждый из них зависит от времени: $s_i = f(s(t))$, то динамика ЭСРЛК будет описываться вектором $S(t) = \{s_1(t), s_2(t), s_3(t) \dots s_n(t)\}$, принадлежащим к пространству состояний.

По характеру предсказуемости ЭСРЛК можно отнести к *детерминированным*

системам с хаотическим поведением [6]. Детерминированность системы проявляется в том, что, исходя из ее текущего состояния, можно прогнозировать состояние системы в будущем. Если при определении текущего состояния допущена хотя бы сколь угодно малая погрешность, со временем она будет нарастать и, начиная с определенного момента, система примет хаотический характер поведения и станет непрогнозируемой [7, с. 110–116]. В этой связи принципиальное значение приобретает такое качество динамической нелинейной системы, как *устойчивость* [7]. Экспоненциальное нарастание погрешности с последующим возникновением бифуркационных режимов, предельных циклов и катастроф, являющихся результатом эволюции исключительно неустойчивых динамических систем. Придание же нелинейной системе устойчивости обеспечивает ее плавную эволюцию и известную степень предсказуемости [8].

Экономическая система регионального лесного комплекса имеет *диссипативный характер*. В связи с тем, что ЭСРЛК является самоорганизующейся целеориентированной структурой, возникающей в результате когерентного поведения большого числа микроэлементов системы (макроэкономической детерминированности), можно говорить об ее диссипативном характере.

В отличие от консервативных, диссипативные структуры имеют свойство с течением времени как бы «забывать» начальные регулирующие воздействия и независимо от их деталей формировать одни и те же (или похожие) стационарные распределения изучаемых переменных. Для физических систем диссипация обусловлена наличием у объекта, на которое направлено внешнее воздействие, таких свойств как вязкость, диффузия, теплопроводность и т.п., которые со временем поглощают силовой импульс. Для экономических систем роль диссипативных сил выполняют характеристики поведения микросубъектов (предельные): предельная склонность к потреблению, сбережению, осуществлению предпринимательской деятельности, производству и потреблению общественных благ. Именно они по мере мультипликации регулирующих воздействий поглощают их первоначальную интенсивность.

Наличие у экономической системы диссипативных свойств имеет очень серьезное значение для разработки направлений и конкретных мер экономической политики. Любые попытки «раз и навсегда исправить» поведение системы, имеющей диссипатив-

ную структуру, бесперспективны. Отдельные регулирующие воздействия никогда не будут иметь «бесконечного» результата. Их эффективность неизбежно угаснет, со временем они будут поглощены и «забыты» системой.

ЭСРЛК является *открытой* системой, обменивающейся с окружающей средой информационными, финансовыми, товарными потоками. В этом смысле экономическая система регионального лесного комплекса — часть однородного единого экономического пространства.

Динамический характер поведения ЭСРЛК обуславливает ее временную эволюцию. Вместе с тем, характеризуя ЭСРЛК как сложную систему, необходимо указать на однонаправленный характер ее временной эволюции. Отсюда следует, что ЭСРЛК относится к динамическим системам с чувствительной зависимостью от начальных условий.

Исходя из того, что ЭСРЛК является динамической, обладающей чувствительной зависимостью от начальных условий, по характеру предсказуемости ее можно отнести к детерминированным системам с хаотическим поведением. Хаотический характер поведения ЭСРЛК обусловлен значительным числом степеней свободы у образующих ее элементов. В соответствии с гипотезой о волновой природе экономического поведения [9], все без исключения элементы ЭСРЛК, как микро-, так и структурные, совершают колебательные движения, передавая энергию экономических импульсов друг другу, в результате чего образуются волновые эффекты. Периодическое движение отдельного элемента ЭСРЛК является модой (или осциллятором). Поскольку между модами существует взаимодействие, эволюция каждого мода (или осциллятора) с определенного момента времени будет определяться не только его собственным состоянием, но и состоянием других мод (осцилляторов).

Существование в ЭСРЛК как минимум трех осцилляторов (сектор бизнеса, сектор домашних хозяйств и общественный сектор) обуславливает наличие чувствительной зависимости системы от начальных условий и возникновение хаотического поведения. Если каждый элемент ЭСРЛК рассматривать как подсистему, состоящую из принадлежащих ей элементов, то выделится множество взаимосвязанных осцилляторов. Следовательно, вероятность обнаружения хаоса в системе повышается.

Исследование волновой динамики ЭСРЛК можно построить по принципу «от индиви-

дуума к коллективу». Математически он выражается в том, что сначала строится и изучается «точечная» модель поведения некоторой системы на основе нелинейных эволюционных уравнений типа:

$$\frac{\partial m_i}{\partial t} = F_i(m_1, m_2 \dots m_n, r, t), \quad (1)$$

где m_i — динамические переменные системы; r — координата элемента, в данном случае являющаяся просто параметром; t — время.

Функция F_i строится, как правило, по типу, характерному для кинетики химических реакций, т.е. содержит мультипликативные нелинейности. В результате обобщения производится переход к эволюционным уравнениям параболического типа:

$$\frac{\partial m_i}{\partial t} = F_i(m_1, m_2 \dots m_n, r, t) + \text{div} \sum D_{ij}, \quad (2)$$

где D_{ij} — коэффициенты линейной (собственной и взаимной) диффузии компонент.

При этом в открытых системах стимулированные потоки могут быть связаны с работой внешних источников, что еще больше увеличивает произвол в коэффициентах.

Для анализа поведения динамической системы следует рассматривать не отдельные процессы и явления, а циклические последовательности экономических преобразований, в которых результат последнего преобразования выступает исходным условием последующего. Поведение динамической системы ЭСРЛК можно подразделить на две стадии:

— первая стадия характеризуется ее стремлением к аттрактору;

— вторая стадия имеет асимптотический характер и определяется тем, что траектория поведения системы ЭСРЛК либо находится на самом аттракторе, либо приближена к нему на расстояние, которым можно пренебречь.

Первая стадия поведения системы является переходной и имеет временные ограничения. Вторая стадия не ограничена во времени, является «вечной». Поведение системы, предполагающее две указанные стадии, относится к категории диссипативных структур. Поведение консервативных систем не предполагает деления на стадии.

В связи с тем, что ЭСРЛК была определена как сложная система с нелинейной динамикой, можно выделить три присущие ей основные особенности, не позволяющие ее упрощать и, соответственно, пользоваться стандартными приемами (например, экстраполяцией) для прогнозирования ее поведения.

1. *Высокая избирательность и чувствительность к воздействиям определенного типа.* Смысл заключается в том, что субъекты экономики активно реагируют только на те импульсы, которые имеют для них приоритетное значение. В результате реакции импульс может усиливаться или ослабевать. Примером служат многочисленные мультипликативные эффекты в экономике [10–12].

2. *Принципиальная роль нелинейных эффектов* (например, пространственной самоорганизации, самофинансирования и пр.). Смысл этой особенности заключается в том, что любой сигнал, поступивший в экономическую систему регионального лесного комплекса, после его усиления должен быть стабилизирован, ограничен, скомпенсирован и, в конечном счете, поглощен диссипативными механизмами.

3. *Проявление эффектов, характерных для одних уровней организации системы регионального лесного комплекса, на других уровнях ее организации.* Законы микроэкономики, описывающие поведение первичных элементов (экономических микросубъектов), определяют состояние этой системы в целом. В частности, волновой характер экономического поведения индивидов определяет волновой характер системы регионального лесного комплекса в целом [13–15].

Здесь необходимо сделать одно важное замечание: все вышеперечисленные свойства экономической системы регионального лесного комплекса обосновываются принципом детерминированного хаоса. Этот принцип заключается в том, что динамические системы со стохастическими свойствами являются типичными, в то время как динамические системы, в которых ни при каких значениях параметров стохастичность не возникает, являются исключением.

В традиционной же экономической теории реализуется принцип классического детерминизма, сформулированный Лапласом. Этот принцип исходит из того, что состояние системы в любой момент времени определимо, т.е. если точно известно ее состояние в начальный момент времени, можно точно эмпирически определить его изменение во времени, а следовательно, его характеристики в любой последующий момент. Принцип классического детерминизма также предусматривает обратимую эволюцию системы, т.е. способность ее элементов одновременно вернуться в состояние, в котором они одновременно уже были.

Понятно, что никакая экономическая система не обладает такой возможностью

в связи с необратимостью условий деятельности субъектов, а также в связи с тем, что индивидуумы, принимающие решения, всегда разные (на смену одним экономическим агентам объективно приходят другие). Кроме того, принцип классического детерминизма отрицает чувствительную зависимость системы от начальных условий. Эта зависимость проявляется в том, что, начиная с какого-то момента времени, поведение системы принимает хаотичный непредсказуемый характер [5].

Принципы детерминированного хаоса вовлечены в научный оборот с середины 70-х гг. прошлого столетия в связи с развитием синергетической концепции. В экономическую теорию эти принципы внедряются через нелинейную экономическую динамику. Данная работа в определенном смысле претендует на продолжение научной мысли, заявленной в этой отрасли знаний.

Проблема описания экономической динамики является актуальной не только для отдельного сектора региональной экономики, но и для региона в целом. Следует отметить, что все реализуемые в последнее время отраслевые стратегии и программы социально-экономического развития региона используют в качестве инструментов прогнозирования сравнение временных рядов и экстраполяцию. Такая ситуация является отражением методологии детерминизма и линейности, которая составляет научную базу наиболее распространенных приемов практического экономического прогнозирования.

В реальной практике динамического моделирования экономических систем наибольшее распространение получили следующие модели:

- динамические ряды, в основе которых лежат трендовые и шаговые модели [16];
- динамические межотраслевые модели, базирующиеся на модели Леонтьева [16];
- оптимизационные методы, реализующие принципы наименьшего действия (или максимизации целевой функции) [17].

Выбор и практическое использование конкретного метода обуславливается спецификой моделируемой системы. Так, плановая экономика прогнозировалась на основе первой и второй динамических моделей. Перспективы эволюции рыночных систем, главной методологической идеей которых, как известно, является принцип рациональности (максимизации целевой функции при известных ограничениях), исследуются с использованием методов оптимизации.

1. Рассмотрим подробнее метод, основанный на анализе динамических рядов, с точки зрения возможностей использования его для описания ЭСРЛК. В основе динамического анализа этого типа лежат следующие понятия:

- траектория движения экономической системы как функция времени:

$$W = W(t); \quad (3)$$

- непрерывный абсолютный прирост функции, который определяется производной по формуле (3):

$$\delta(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{W(t + \Delta t) - W(t)}{\Delta t} = \frac{dW(t)}{dt}; \quad (4)$$

- непрерывный темп прироста определяется логарифмической производной следующего вида:

$$\rho(t) = \frac{\frac{dW(t)}{dt}}{W(t)} = \frac{d \ln W(t)}{dt}; \quad (5)$$

- абсолютный прирост определяется по второй производной:

$$Y_{tt} = \frac{d\delta(t)}{dt} = \frac{d^2 W(t)}{dt^2}, \quad (6)$$

$$X_{tt} = \frac{\frac{d\delta}{dt}}{\delta} = \frac{d \ln \delta(t)}{dt}. \quad (7)$$

Трендовые модели описывают экономический рост функциями вида:

$$U(t) = B \frac{dU(t)}{dt} + C(t). \quad (8)$$

Уравнение (8) представляет собой простейшее дифференциальное уравнение первого порядка, решение которого представляет собой сумму общего решения однородного уравнения и частного решения неоднородного уравнения. Получаем:

$$U(t) = V_{exp} \left(\frac{t}{B} \right) + C(0). \quad (9)$$

Решение уравнения (8) вида (9) можно использовать, например, для изучения темпов роста регионального лесного промышленного комплекса (РЛПК) в зависимости от монотонно меняющихся инвестиций.

2. Метод оптимального управления РЛПК. В задаче оптимизации суммарного фонда потребления РЛК в качестве фазового

переменного может выступать величина доходов (y), получаемых от деятельности РЛК, а в качестве управляемого параметра можно рассмотреть величину инвестиций, направляемых в региональный лесной комплекс. В этом случае динамика ЭСРЛК будет описываться следующей системой уравнений:

$$\begin{cases} \int_0^T (y - u) dt \rightarrow \max \\ \frac{du}{dt} = \frac{1}{B} u \\ 0 \leq u(t) \leq y(t) \\ y(W) = y_0 \end{cases} \quad (10)$$

Функция Гамильтона равна:

$$\begin{cases} H(y, p, u) = y - u + \frac{p}{B} u \\ \frac{dp}{dt} = \frac{\partial H}{\partial y} \end{cases} \quad (11)$$

где y — двойственная переменная.

Принцип оптимизации позволяет определить наилучшую траекторию развития ЭСРЛК с помощью функции Гамильтона, содержащей набор характерных для ЭСРЛК переменных.

3. Динамические межотраслевые модели (модель Леонтьева).

В.В. Леонтьев впервые предложил описание динамики экономических систем с помощью системы линейных дифференциальных уравнений в категориях «затраты» — «выпуск». Уравнение межотраслевого баланса имеет вид матричного линейного дифференциального уравнения:

$$U(t) = AU(t) + B \frac{dU(t)}{dt} + C(t), \quad (12)$$

где $U(t)$ — вектор столбец неизвестных переменных; $\frac{dU(t)}{dt}$ — вектор столбец абсолютного прироста производства; A, B — матрицы из коэффициентов, которые зависят от параметров, определяющих эволюцию РЛК; $C(t)$ — вектор столбец потребления продукции РЛК.

Следует отметить две особенности модели Леонтьева:

1. Матричные уравнения, используемые В.В. Леонтьевым, являются линейными, корни уравнений имеют также комплексно-сопряженные значения, которые описывают колебательный процесс с постоянной частотой и амплитудой.

2. Полученные решения предполагают наличие волнового процесса в отраслевой структуре доходов, получаемых от РЛК, в зависимости от инвестиций в эту отрасль.

Отметим некоторые несовершенства рассмотренных моделей, препятствующих конструктивному использованию в целях прогнозирования эволюции ЭСРЛК. Модели, описанные в пп. 1–3, способны отразить исключительно *линейный* характер развития ЭСРЛК. В этих моделях не учитываются взаимодействия, имеющие полевую природу, не используются константы взаимодействия. Кроме того, уравнения Леонтьева фактически постулируются, а не выводятся из уравнений непрерывности и движения для конкретных экономических параметров.

Самое главное замечание: уравнения Леонтьева, будучи инструментами линейной динамики, не имеют слагаемых, описывающих нелинейные процессы. Это обстоятельство обуславливает существенную прогностическую ограниченность данного метода описания любых экономических систем (в том числе и ЭСРЛК), природа динамики которых предполагает взаимодействия и, соответственно, нелинейность.

Не менее существенным замечанием, на наш взгляд, является нестрогость размерности используемых в модели экономических величин (конечное уравнение Леонтьева по логике должно быть записано в безразмерной форме) и т.д.

Реализация отмеченных выше ограничений выходит за рамки данного исследования. Тем не менее в целях описания динамики экономической системы регионального лесного комплекса мы можем предложить (без выведения) нелинейное эталонное уравнение, которое является нелинейным обобщением известного матричного уравнения Леонтьева (12). Оно имеет вид:

$$\frac{dU}{dt} + A \frac{dU}{dx} + \sum_{\beta=1}^s H_{\alpha}^{\beta} \frac{\partial}{\partial t} + K_{\alpha}^{\beta} \frac{\partial}{\partial x} U + C(t), \quad (13)$$

где x — пространственная переменная; H_{α}^{β} , K_{α}^{β} — матрицы, элементы которых также зависят от параметров, характеризующих ЭСРЛК.

Следует отметить, что эталонное уравнение (13) получается из уравнения (12) путем добавления членов, описывающих изменения экономической системы в пространстве. Данная модель повышает точность прогнозирования экономического роста регионального лесного комплекса. В целом

новые явления в экономических системах, предсказываемые нелинейными моделями (детерминированный хаос, бифуркация и т.д.), требуют фундаментального экономического осмысления и выхода на реальные управленческие механизмы.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Малинецкий Г.Г. Хаос. Структуры. Вычислительный эксперимент. Введение в нелинейную динамику / Г.Г. Малинецкий. — Москва : Едиториал УРСС, 2002. — 256 с.
2. Могилевский В.Д. Формализация динамических систем / В.Д. Могилевский. — Москва : Вуз. кн., 1999. — 216 с.
3. Структуры и хаос в нелинейных средах / Т.С. Ахромеева, С.П. Курдюмов, Г.Г. Малинецкий, А.А. Самарский. — Москва : Физматлит, 2007. — 488 с. — EDN MUWRPD.
4. Экономика и менеджмент в условиях нелинейной динамики / А.А. Акимченко, А.А. Алетдинова, В.Ю. Анисимова [и др.]. — Санкт-Петербург : Изд-во С.-Петерб. политех. ун-та им. Петра Великого, 2017. — 773 с. — EDN YKIEVH.
5. Петраков Н.Я. Фактор неопределенности и управление экономическими системами / Н.Я. Петраков, В.И. Ротарь, С.А. Айвазян. — Москва : Наука, 1985. — 191 с.
6. Шустер Г. Детерминированный хаос. Введение / Г. Шустер. — Москва : Мир, 1988. — 240 с.
7. Огородникова Т.В. Корпускулярно-волновая концепция экономического поведения микросубъекта / Т.В. Огородникова. — Иркутск : Изд-во БГУЭП, 2005. — 140 с.
8. Чупров С.В. Теория управления и устойчивость производственных систем / С.В. Чупров. — Иркутск : Изд-во БГУЭП, 2007. — 440 с.
9. Огородникова Т.В. Нелинейное волновое поведение микросубъектов экономики и солитоны / Т.В. Огородникова. — Иркутск : Изд-во БГУЭП, 2004. — 132 с.
10. Занг В.Б. Синергетическая экономика. Время и перемены в нелинейной экономической теории / В.Б. Занг. — Москва : Мир, 1999. — 335 с.
11. Давыдова Г.В. Зависимость эффективности лесной промышленности и лесного хозяйства от формы собственности: международное сравнение / Г.В. Давыдова, Д.А. Литвин. — EDN LXAVJR // Известия Байкальского государственного университета. — 2022. — № 6. — С. 242–263.
12. Давыдова Г.В. Особенности развития лесной промышленности и лесного хозяйства в России и за рубежом / Г.В. Давыдова, А.И. Бирюкова, Д.А. Литвин. — DOI 10.17150/2500-2759.2022.32(2).325-332. — EDN SYSCZP // Известия Байкальского государственного университета. — 2022. — № 2. — С. 325–332.
13. Афанасьев В.Н. Математическая теория конструирования систем управления / В.Н. Афанасьев, В.Б. Колмановский, В.Р. Носов. — Москва : Высш. шк., 2003. — 614 с.
14. Булгакова М.А. Импортзамещение в лесном секторе России: проблемы и перспективы / М.А. Булгакова. — EDN YOGFUT // Проблемы экономики и юридической практики. — 2018. — № 5. — С. 52–56.
15. Булгакова М.А. Механизм сбалансированности экономических интересов субъектов лесного сектора экономики / М.А. Булгакова. — EDN YOGFUL // Проблемы экономики и юридической практики. — 2018. — № 5. — С. 48–52.
16. Леонтьев В.В. Экономические эссе. Теории, исследования, факты и политика / В.В. Леонтьев. — Москва : Политиздат, 1990. — 415 с.
17. Конторович Л.В. Оптимальные решения в экономике / Л.В. Конторович, А.Б. Горстко. — Москва : Наука, 1972. — 231 с.

REFERENCES

1. Malinetskii G.G. *Chaos. Structures. Computational experiment. Introduction to nonlinear dynamics*. Moscow, Editorial URSS Publ., 2002. 256 p.
2. Mogilevskii V.D. *Formalization of dynamic systems*. Moscow, Vuzovskaya kniga Publ., 1999. 216 p.
3. Akhromeeva T.S., Kurdyumov S.P., Malinetskii G.G., Samarskii A.A. *Structures and chaos in nonlinear media*. Moscow, Fizmatlit Publ., 2007. 488 p. EDN: MUWRPD.
4. Akimchenko A.A., Aletdinova A.A., Anisimova V.Yu., Babkin A.V., Bogdanova E.L. *Economics and management in conditions of nonlinear dynamics*. Saint Petersburg, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, 2017. 773 p. EDN: YKIEVH.
5. Petrakov N.Ya., Rotar' V.I., Aivazyan S.A. *Uncertainty factor and management of economic systems*. Moscow, Nauka Publ., 1985. 191 p.
6. Schuster H. *Deterministic Chaos: an Introduction*. Weinheim, Federal Republic of Germany, 1988. 304 p. (Russ. ed.: Schuster H. *Deferministic Chaos: an Introduction*. Moscow, Mir Publ., 1988. 240 p.).
7. Ogorodnikova T.V. *Corpuscular-wave concept of economic behavior of a micro-subject*. Irkutsk, Baikal State University of Economics and Law Publ., 2005. 140 p.
8. Chuprov S.V. *Control theory and sustainability of production systems*. Irkutsk, Baikal State University of Economics and Law Publ., 2007. 440 p.
9. Ogorodnikova T.V. *Nonlinear wave behavior of economic micro-subjects and solitons*. Irkutsk, Baikal State University of Economics and Law Publ., 2004. 132 p.
10. Zhang W.B. *Synergetic Economics Time and Change in Nonlinear Economics*. 1991. 246 p. (Russ. ed.: Zhang W.B. *Synergetic Economics Time and Change in Nonlinear Economics*. Moscow, Mir Publ., 1999. 335 p.).

11. Litvin D.A., Davydova G.V. Dependence of the Timber Industry and Forest Sector Efficiency on the Ownership Form: an International Comparison. *Izvestiya Baikal'skogo gosudarstvennogo universiteta = Bulletin of Baikal State University*, 2022, no. 6, pp. 242–263. (In Russian). EDN: LXAVJR.
12. Davydova G.V., Biryukova A.I., Litvin D.A. Features of the Development of the Forest Industry and Forestry in Russia and Abroad. *Izvestiya Baikal'skogo gosudarstvennogo universiteta = Bulletin of Baikal State University*, 2022, no. 2, pp. 325–332. (In Russian). EDN: SYSCZP. DOI: 10.17150/2500-2759.2022.32(2).325-332.
13. Afanas'ev V.N., Kolmanovskii V.B., Nosov V.R. *Mathematical theory of design of control systems*. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 2003. 614 p.
14. Bulgackova M.A. Import Substitution In The Forest Sector Of Russia: Problems And Perspectives. *Problemy ekonomiki i yuridicheskoi praktiki = Economic Problems and Legal Practice*, 2018, no. 5, pp. 52–56. (In Russian). EDN: YOGFUT.
15. Bulgackova M.A. *Problemy ekonomiki i yuridicheskoi praktiki = Economic Problems and Legal Practice*, 2018, no. 5, pp. 48–52. (In Russian). EDN: YOGFUL.
16. Leont'ev V.V. *Economic essays. Theories, research, facts and policy*. Moscow, Politizdat Publ., 1990. 415 p.
17. Kontorovich L.V., Gorstko A.B. *Optimal solutions in economics*. Moscow, Nauka Publ., 1972. 231 p.

Информация об авторах

Давыдова Галина Васильевна — доктор экономических наук, профессор, кафедра отраслевой экономики и управления природными ресурсами, Байкальский государственный университет, г. Иркутск, Российская Федерация, e-mail: DavydovaGV@bgu.ru, SPIN-код: 9989-3938, AuthorID РИНЦ: 499648, Scopus Author ID: 57212874569.

Булгакова Марина Александровна — доктор экономических наук, профессор, кафедра организации финансово-экономического, материально-технического и медицинского обеспечения, Академия управления МВД России, г. Москва, Российская Федерация, e-mail: mbulgackova@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3834-7694>, SPIN-код: 4371-2451, AuthorID РИНЦ: 757134.

Вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования

Давыдова Г.В. Совершенствование свойств и моделирование динамики роста экономической системы регионального лесного комплекса в условиях детерминированного хаоса / Г.В. Давыдова, М.А. Булгакова. — DOI 10.17150/2500-2759.2024.34(2).331-340. — EDN MLJQTZ // Известия Байкальского государственного университета. — 2024. — Т. 34, № 2. — С. 331–340.

Authors

Galina V. Davydova — D.Sc. in Economics, Professor, Department of Sectoral Economics and Natural Resource Management, Baikal State University, Irkutsk, the Russian Federation, e-mail: DavydovaGV@bgu.ru, SPIN-Code: 9989-3938, AuthorID RSCI: 499648, Scopus Author ID: 57212874569.

Marina A. Bulgakova — D.Sc. in Economics, Professor, Department of Organization of Financial and Economic, Logistical and Medical Services, Academy of Management of the Ministry of Internal Affairs of Russia, Moscow, the Russian Federation, e-mail: mbulgackova@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3834-7694>, SPIN-Code: 4371-2451, AuthorID RSCI: 757134.

Contribution of the Authors

The authors contributed equally to this article. The authors declare no conflicts of interests.

For Citation

Davydova G.V., Bulgakova M.A. Improving the Properties and Modeling the Growth Dynamics of the Economic System of the Regional Forest Complex in Conditions of Deterministic Chaos. *Izvestiya Baikal'skogo gosudarstvennogo universiteta = Bulletin of Baikal State University*, 2024, vol. 34, no. 2, pp. 331–340. (In Russian). EDN: MLJQTZ. DOI: 10.17150/2500-2759.2024.34(2).331-340.