

НуНа правах рукописи

БЕЛОУСОВ ФЕДОР АНАТОЛЬЕВИЧ

**МОДЕЛИ СОЦИАЛЬНО-ЭКОНОМИЧЕСКИХ И
ДЕМОГРАФИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ СООБЩЕСТВ С
ПРОСТЕЙШЕЙ СОЦИАЛЬНОЙ СТРУКТУРОЙ**

08.00.13 Математические и инструментальные методы экономики

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата экономических наук

Москва – 2019

Работа выполнена в лаборатории динамических моделей экономики и оптимизации Федерального государственного бюджетного учреждения науки « Центральный экономико-математический институт РАН»

Научный руководитель: **Беклярян Лева Андреевич**,
доктор физико-математических наук, профессор

Официальные оппоненты: **Поспелов Игорь Гермогенович**,
член-корреспондент РАН, доктор физико-математических наук, профессор, заведующий отделом ВЦ РАН, профессор Высшей школы экономики

Давыдов Денис Витальевич
доктор экономических наук, руководитель научно-исследовательских работ РЭШ, доцент

Ведущая организация: **Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова Экономический факультет**

Защита диссертации состоится «23» сентября 2019 г. в 13 часов на заседании диссертационного совета Д 002.013.01 при Федеральном государственном бюджетном учреждении науки « Центральный экономико-математический институт РАН» по адресу: 117418, г. Москва, Нахимовский проспект, д. 47, ауд. 520.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБУН ЦЭМИ РАН и на сайте ФГБУН ЦЭМИ РАН <http://www.cemi.rssi.ru>

Сведения о защите и автореферат размещены на сайте Высшей аттестационной комиссии при Министерстве образования и науки Российской Федерации <http://vak.ed.gov.ru>

Автореферат разослан « ____ » июля 2019 г.

Ученый секретарь
Диссертационного совета Д 002.013.01,
кандидат экономических наук



—А.И. Ставчиков

I. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. В истории человечества неоднократно были зафиксированы случаи внезапного и неожиданного полного исчезновения целого социума (государства, племени), либо значительного сокращения численности населения такого социума. Историческими примерами таких событий являются исчезновение племени Майя, гибель цивилизаций Ближнего востока на рубеже XIII–XII веков до н.э. (древние египтяне, вавилоняне, минойцы и микенцы, хетты и др.), исчезновение жителей острова Пасхи и т.д. (Ф. Бурбон, Валерия М. де Фабианис, 2001; Ко Майкл, 2007; Чарльз Галленкамп, 1996; Bahn, P.G., Flenley, J., 1992; Dickinson, 2007; Eric H. Cline., 2014). Причинами исчезновения многих племен, государств и цивилизаций зачастую служат не какие-то внешние негативные природные факторы (хотя и они тоже), а факторы, связанные с социальной напряженностью внутри рассматриваемого общества. Социальная напряженность может проявляться в виде агрессии одних представителей общества по отношению к другим. Результатами подобных явлений могут быть революции, а также различного рода войны, которые могут приводить к заметному сокращению населения. Ярким примером таких событий может послужить революция в России 1917 года и последовавшая за ней гражданская война. Эти события, как известно, привели к огромным человеческим жертвам и резкому падению численности населения в России в первой четверти XX века.

Внутренняя напряженность в обществе также может быть спровоцирована внешними катастрофическими явлениями. Значительные катастрофические события зачастую сопровождаются жертвами среди населения, а также заметными инфраструктурными разрушениями. Все эти факторы в комплексе в некоторых случаях могут приводить к разрушению прежних социальных структур и институтов, что в свою очередь может стать причиной социальной напряженности в рассматриваемом обществе. Последствия такой социальной напряженности и возникающих внутренних конфликтов зачастую сопоставимы или даже превышают последствия самого катастрофического явления. В качестве одного из ярких, относительно недавно произошедших примеров можно привести ситуацию, которая сложилась после урагана Катрина в США в 2005 году (Ronald J. Daniels, 2006). Помимо массовых человеческих жертв и значительных инфраструктурных разрушений, после данного события было зафиксировано большое количество случаев мародерств опустевших домов, против которых полиция оказалась бессильна. Таким образом все социальные структуры на соответствующей территории были разрушены и, грубо говоря, все общество было поделено на жертв этой катастрофы (они стара-

лись покинуть территорию) и тех, кто в результате трагедии желал получить наживу путем грабежа и мародерства.

В силу вышеизложенного, чрезвычайно актуальной является попытка ответить на вопрос почему возможно исчезновение целого сообщества с простой социально-экономической структурой или исчезновение отдельной группы такого сообщества, которая отличается от остальных своей причастностью к процедуре воспроизводства продукта. Предполагается, что такие сообщества могли наблюдаться в далекой древности, либо они могут возникать в современных условиях в силу скажем катаклизмов или еще каких либо воздействий, результатом которых является разрушение прежних социальных структур и низведение этих структур до простейших структур социальной организации.

Степень разработанности проблемы. Существует достаточно много работ, в которых так или иначе изучаются социально-экономические и демографические вопросы. Первые модели, характеризующие динамику численности популяций описывались при помощи дифференциальных уравнений. Одной из первых нетривиальных работ в этой области видимо является модель, описываемая так называемым логистическим уравнением, которая была опубликована Ферхюльстом еще в 1834 году (Verhulst, P. F., 1834; Базыкин А.Д., 1985). В этой модели рассматривается динамика численности некоторой популяции с ограниченным ресурсом. Другой знаковой моделью является модель «хищник-жертва» она же модель Лотки-Вольтерра, опубликованная в середине 20-х годов прошлого столетия, в которой с помощью дифференциальных либо разностных уравнений изучается динамика численности «жертв» и «хищников» (Базыкин А.Д., 1985). Это направление развивается и сейчас, о чем более подробно будет сказано чуть ниже. Одновременно с этим, во второй половине XX века постепенное совершенствование компьютерных и информационных технологий дало импульс направлению, получившему название «имитационное моделирование», одной из ветвей которого является агент-ориентированный подход либо агент-ориентированное моделирование. Суть данного подхода заключается в моделировании в рамках компьютерной программы интересующего процесса с целью проведения экспериментов не в реальном, а в виртуальном мире, что дает множество неоспоримых преимуществ. Одной из наиболее известных ранних моделей, которая может быть отнесена к категории имитационных, агент-ориентированных моделей, является модель «жизнь», созданная в 1970 году математиком Джоном Конвеем и представляющая из себя простой клеточный автомат (Andrew Adamatzky, 2010). На данном этапе развития науки имитационное и агент-ориентированное моделирование очень сильно распространены,

в частности эти подходы находят свое широкое применение при изучении социально-экономических и демографических процессов.

Одной из знаковых моделей построенной на основе агент-ориентированного подхода, является так называемая «сахарная модель» (Epstein J., Axtell R., 1996). С помощью этой модели изучается целый ряд социально-экономических и демографических вопросов, среди которых такие, как войны, торговля, распространение эпидемий, культурный обмен, миграция и пр. Ключевым фактором в модели является некоторый ограниченный ресурс, который носит название «сахар», именно ему модель обязана своим названием. Потребность агентов в данном ресурсе является основным фактором, благодаря которому в рамках модели возникают многие из перечисленных чуть выше явлений в обществе. В некоторых модификациях «сахарной модели» агенты образуют различные группы, которые могут конкурировать между собой вплоть до открытой вражды. Однако правила, по которым в модели происходят такие объединения в группы, обусловлены не причастностью агентов к способу воспроизводству продукта, а принадлежностью к тому или иному клану или коалиции.

Имеется целый ряд работ, в которых на основе имитационного моделирования исследуются отдельно взятые племена, государства и цивилизации. В качестве примера можно привести статью Скота Хекберта (Scott Heckbert, 2013), в которой описана модель цивилизации Майя с учетом социально-экологических особенностей. Также можно привести примеры и других моделей среди которых можно отметить модель ранних сельскохозяйственных обществ на юго-западе США (Kohler T.A., 2007), либо модель ранних сельскохозяйственных обществ ближнего Востока (Wilkinson T. J., 2007). Авторы таких моделей стараются учесть климатические и географические особенности территорий, на которых обитали данные сообщества.

Интересной также является работа (Guzman R.A., 2018), в рамках которой осуществляется моделирование сосуществования различных сообществ, обитающих на едином ареале. Каждое из сообществ занимает определенную территорию и может характеризоваться либо простой, либо сложной структурой. Структура сообщества может трансформироваться как из простой в сложную, так и обратно. Различные сообщества могут воевать друг с другом, захватывая земли соседей, также при выполнении определенных условий в каждом из них могут происходить гражданские войны, приводящие к разбиению некогда единого сообщества на два независимых. Отличительной особенностью данной модели является то, что агентами в ней являются не люди, либо домохозяйства, а сообщества целиком.

Другим, заслуживающим внимания проектом, является серия моделей, каждая из которых реализована на суперкомпьютере с помощью высокопроизводительной программной среды Пандора (Wittek P., Rubio-Campillo X., 2012) в Барселоне. Одной из таких моделей является модель охотников и собирателей (hunter-gather groups), существовавших в северном Гуджарате (Индия) (Balbo A.L., 2014). Другой похожей моделью является модель охотников, рыбаков и собирателей, обитавших в Аргентине и Чили (Santos J.I., 2015). Создатели приведенных моделей попытались учесть географические и климатические особенности соответствующих регионов, а их калибровка осуществляется на базе археологических и антропологических данных. Более подробно описанный подход изложен в работе (Rubio-Campillo X., 2015).

Другой известный класс моделей, в которых сосуществуют по крайней мере два функционально различных вида агентов, это упомянутая выше модель Лотки-Вольтерра (модель «хищник-жертва») и ее различные модификации, которые в некоторых случаях рассматриваются в экономической интерпретации с конкуренцией фирм за ограниченный рынок сбыта (Базыкин А.Д., 1985; Базыкин А.Д., 2003; Разжевайкин В.Н., 2007; Бродский Ю.И., 2010). В классической модели «хищник-жертва» «хищники» охотятся за «жертвами», которые являются для них источником пропитания. Описание и исследование этих моделей осуществляется на языке дифференциальных либо разностных уравнений, что предполагает идентичность и неразличимость всех агентов одного вида друг от друга. Также отличительной особенностью данного инструментария является то, что в таких моделях не всегда просто учесть все необходимые ограничения. В этом смысле более выигрышным выглядит агент-ориентированный подход, в рамках которого каждый агент отличим от остальных и имеет свои индивидуальные характеристики (возраст, местоположение и пр.), также этот подход позволяет учесть практически любые ограничения.

Отдельное место в диссертационной работе занимает модель Соле-Манрубиа (Sole V. R., Manrubia S. C., 1996; Henning P. A., 2008). В модели изучается вопрос внезапного вымирания большого числа видов живых организмов в результате внутренних причин, эволюционно сложившихся путем благотворного или негативного воздействия одних видов живых организмов на другие. Данная модель интересна тем, что она является очень простой по своей конструкции, но при этом закон распределения, характеризующий количество вымирающих с течением времени видов живых организмов примерно совпадает с тем законом распределения, который получен на основе исторических и археологических данных. В диссертационной работе представлены модификации этой модели, с попыткой перенести ее

результаты на общество, в котором так же как и в исходной модели, между ее представителями устанавливаются положительные и отрицательные взаимосвязи.

Объектом исследования являются общества с простейшей социальной организацией, экономическое взаимодействие в которых основано на конкурентной борьбе его представителей за ограниченный ресурс. Такого типа общества могут наблюдаться как на этапах своего зарождения, так и в посткатастрофических стадиях, когда отдельно взятое общество пережило катастрофу, и практически все его социальные институты и структуры были разрушены.

Предметом исследования являются условия, при которых наблюдается либо вымирание популяции (цивилизации) с простейшей социальной организацией, либо значительное сокращение численности её населения. Также предметом исследования являются условия сосуществования различных типов агентов, отличающихся своей причастностью к процедуре воспроизводства продукта (« кочевники» и « земледельцы»).

Цель и задачи исследования. Целью работы является выявление и изучение условий, при которых наблюдается вымирание сообществ с простейшей социальной организацией или значительное сокращение численности населения, а также выявление условий, при которых можно наблюдать сосуществование двух типов сообществ с различным способом воспроизводства продукта (« кочевников» и « земледельцев»). Для достижения данной цели необходимо решить следующие задачи:

- Разработка и программная реализация серии имитационных и агент-ориентированных моделей;
- На основе построенных моделей проведение множества экспериментов, наработка базы экспериментальных данных;
- Осуществление эконометрического, статистического и вейвлет-анализа полученных данных;
- Выявление области параметров, при которых наблюдается та или иная качественная динамика каждой из построенных моделей.

Научная новизна исследования. В диссертационной работе предложен подход к изучению социально-экономических и демографических процессов, основанный на создании серии имитационных моделей, построенных по принципу « от простого к сложному» . Такая усложняющаяся цепочка моделей позволяет оценить воздействия вновь вводимых характеристик, что невозможно в изначально сложных многофакторных моделях.

- Выявлены условия вымирания отдельных сообществ популяции (исчезновение « кочевников» , либо « земледельцев»), различающиеся своим устоявшим-

ся типом воспроизводства продукта. Определены условия, при которых наблюдается сосуществование различных сообществ популяции. Такие условия сформулированы в терминах областей параметров модели и являются новыми.

- Показано, что соотношение между площадью ареала и размером популяции является устойчивым при переходе от одних модификаций модели к другим. Устойчивость этого соотношения указывает на объективный характер найденных инвариантов и их независимость от конструктивных особенностей рассматриваемых моделей.

- Построена не имеющая аналогов популяционная модель, в которой учтены сложные пространственные ограничения на перемещения агентов по ареалу. Для этой модели получены условия как сосуществования различных видов агентов, так и вымирания одного из видов.

- Предложена интерпретация одной из представленных моделей основанная на отождествлении агентов с экономическими субъектами (фирмами, домохозяйствами и пр.). Выдвинута гипотеза о возможных механизмах возникновения кризисных явлений в экономических системах в результате действия резонанса между поведением различных экономических агентов, которая находит свое подтверждение в рамках данной модели.

Теоретическая и практическая значимость. Работа носит теоретический характер. Результаты могут быть применены в различных научных областях, среди которых экономика, социология, демография и история. Так, с помощью представленных имитационных моделей может быть осуществлен сценарный анализ, который заключается в многократном повторении экспериментов при различных начальных данных. Такой анализ позволяет предсказать распределение возможных конечных состояний системы в зависимости от начальных состояний. Сценарный анализ может быть востребован как для анализа возможных состояний системы в будущем, так и для анализа событий происходивших в прошлом, о которых к настоящему времени известно крайне мало (например исчезновение тех или иных популяций или цивилизаций, произошедших в древности).

Отметим, что современное общество является гораздо более сложным по своей структуре, чем рассматриваемые в работе общества. Предполагается, что более древние общества могли иметь примерно похожий способ самоорганизации. Как уже было отмечено выше, общества, пережившие катастрофу, также могут обладать схожей структурой. В работе нет привязки к определенным географическим, климатическим или каким либо еще условиям, можно считать, что изучается некоторое абстрактное общество с заданными правилами взаимоотношений его представителей друг с другом.

Методология и методы исследования. Методология исследования в данной диссертационной работе заключается на первом этапе в создании серии имитационных и агент-ориентированных моделей, на втором этапе в проведении множества экспериментов и на третьем в анализе данных, полученных на втором этапе. Основными методами, используемыми в работе являются методы имитационного и агент-ориентированного моделирования, методы математические статистики и эконометрики, а также вейвлет-анализ.

Положения, выносимые на защиту. В работе представлена серия имитационных и агент-ориентированных моделей, а также анализ экспериментальных данных этих моделей. На основе экспериментальных данных произведен качественный анализ рассматриваемых социально-экономических систем. Получены следующие, выносимые на защиту результаты:

- На базе известной модели Соле-Манрубиа, разработана серия имитационных моделей, в которых поведение агентов формируется случайным образом, без учета анализа ситуации. В рамках данных моделей был получен эффект полного вымирания всей популяции;

- На основе модели Соле-Манрубиа представлена её экономическая модификация, в которой роль агентов выполняют не представители какой-либо популяции, а экономические агенты, например фирмы или домохозяйства. В рамках этой модели получена частота разорения агентов, на основе которой можно делать выводы о частоте наступления кризисных явлений в экономике;

- Разработана агент-ориентированная социально-экономическая модель, агенты которой наделены субъектностью в принятии решений, что выражается в том, что решения принимаются не случайным образом, а на основе анализа информации из окружающей среды. Также в модель добавлен ограниченный ресурс, который в некоторых ситуациях провоцирует конкурентную борьбу между агентами. Для данной модели выявлены области параметров, при которых происходит вымирание всей популяции, а также области параметров, при которых популяция существует на обозримых интервалах времени;

- Разработана агент-ориентированная социально-экономическая модель с неоднородной социальной структурой – модель «кочевников» и «землепашцев». Неоднородность выражается в наличии в модели двух типов агентов, каждый из которых характеризуется своим способом воспроизводства продукта. Построены различные модификации данной модели, для каждой из них определены области параметров, при которых наблюдается та или иная качественная динамика. Проведен статистический, эконометрический, а также вейвлет-анализ полученных с помощью модели экспериментальных данных.

Область исследования соответствует требованиям следующих разделов паспорта специальности ВАК 08.00.13 – « Математические и инструментальные методы экономики» :

1. Математические методы:

1.9. « Разработка и развитие математических методов и моделей анализа и прогнозирования развития социально-экономических процессов общественной жизни: демографических процессов, рынка труда и занятости населения, качества жизни населения и др.»

2. Инструментальные средства:

2.1. « Развитие теории, методологии и практики компьютерного эксперимента в социально-экономических исследованиях и задачах управления»

2.2. « Конструирование имитационных моделей как основы экспериментальных машинных комплексов и разработка моделей экспериментальной экономики для анализа деятельности сложных социально-экономических систем и определения эффективных направлений развития социально-экономической и финансовой сфер»

Апробация и внедрение результатов исследования. Основные научные положения и результаты исследования были представлены в Ситуационной комнате ЦЭМИ РАН, а также в рамках симпозиумов и конференций, в т.ч.:

- X Международной конференции « Применение многомерного статистического анализа в экономике и оценке качества» , НИУ ВШЭ, ЦЭМИ РАН, 26-28 августа 2014 г.;

- Международная конференция « XXVII Крымская Осенняя Математическая Школа-симпозиум по спектральным и эволюционным задачам» (КРОМШ-2016), 2016 г.;

- XIII Международной научной конференция « Теория операторов, комплексный анализ и математическое моделирование» , 7-14 сентября 2016 г.;

- Международная конференция, посвященная 100-летию со дня рождения Селима Горигорьевича Крейна, 13-19 ноября 2017 г. ;

- IX Московская международная конференция по исследованию операций (ORM2018), 22-27 октября 2018 г.

Кроме того, материалы данного диссертационного исследования использовались в учебном процессе Национального исследовательского университета « Высшая школа экономики» : в магистерской программе « Бизнес-информатика» Школы бизнес-информатики Факультета бизнеса и менеджмента по дисциплине « Экономико-математическое моделирование» , научный семинар « Информационная бизнес-аналитика» ; в бакалаврской программе « Бизнес-аналитика» по дисциплине

нам « Моделирование процессов и систем» , научный семинар « Информационная бизнес-аналитика» для студентов 4 курса.

Публикации по теме диссертационного исследования. По теме диссертации опубликовано 11 печатных работ общим объемом 5,5 п.л. (вклад автора – 5,22), из них 4 работы опубликованы в журналах, входящих в перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертации на соискание ученой степени кандидата наук, из них 2 работы опубликованы в издании, индексируемом в базе данных RSCI.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения и списка литературы. Объем диссертации составляет 112 страниц машинописного текста. Список использованной литературы содержит 41 наименований.

В первой главе представлена модель Соле-Манрубиа, а также ее модификации, в рамках которых наблюдается эффект вымирания популяции. Отдельно представлена экономическая модель, также являющаяся модификацией модели Соле-Манрубиа.

Во второй главе рассматривается принципиально другая по своей конструкции модель. Если в имитационной модели Соле-Манрубиа и ее модификациях вся динамика реализована с помощью процедур перемножения матриц и векторов, то во второй главе реализована агент-ориентированная модель, в которой агенты обитают и взаимодействуют на ареале. Кроме самих агентов в новую модель вводится некоторый ограниченный ресурс, за который агенты могут развернуть конкурентную борьбу.

В третьей, заключительной главе рассматривается модель « кочевников» и « земледельцев» , то есть агенты разделяются на два принципиально разных класса, каждый из которых характеризуется своей причастностью к процедуре воспроизводства продукта. Изучаются различные модификации такой модели, в частности модификация, в которой наложено ограничение на максимально возможную удаленность агентов от места их рождения. Анализ полученных экспериментальным путем модельных данных осуществляется на основе статистических и эконометрических данных. Кроме этого в последнем разделе третьей главы продемонстрирован вейвлет-анализ результатов данной модели.

II. ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Основные положения диссертации, выносимые на защиту

1. Исследована и модифицирована модель Соле-Манрубиа, выявлены условия полного исчезновения популяции за счет внутренних причин. Также представлена экономическая модификация модели Соле-Манрубиа.

Представлена исходная модель Соле-Манрубиа с новой интерпретацией агентов в этой модели как представителей некоторого простейшего общества. В рамках первой главы разработана серия модификаций данной модели, каждая из которых отвечает на свои поставленные вопросы. Отдельно изложена экономическая модификация модели Соле-Манрубиа, с помощью которой осуществлена попытка взглянуть на кризисные явления в экономике как на некоторые случайные события, являющиеся следствием правил и законов, на основе которых функционируют экономические системы. Модель реализована как игра с нулевой суммой.

В исходной модели Соле-Манрубиа изучается вопрос резкого сокращения популяции некоторых живых организмов, однако в рамках этой модели не наблюдается эффекта полного вымирания всех агентов. Для получения такого эффекта создана серия моделей, в каждую из которых была введена своя особенность, приводящая к нужному результату. Самая простая модификация модели предполагает введение ассиметрии во взаимоотношения между агентами, а именно, в данном случае агенты будут оказывать друг на друга больше негативного воздействия, нежели положительного. Экспериментально удалось определить пороговое значение соотношения негативного и положительного воздействия, при котором за наблюдаемый интервал времени можно наблюдать исчезновение рассматриваемой популяции. Другая модификация предполагает наличие фактора мести во взаимоотношениях между агентами. Это означает, что если некоторый агент негативно воздействует на другого агента, то тот будет отвечать первому агенту также некоторым негативным воздействием. Если же воздействие оказывается положительным, то ответной реакции следовать не будет. Такая алгоритмика поведения также приводит к исчезновению всей популяции за ограниченное время.

Важной особенностью данного семейства моделей является очень простая конструкция этих моделей и, как следствие, очень простые правила взаимодействия агентов друг с другом. Все операции в модели организованы в рамках перемножения матриц друг на друга и перемножения матриц на вектор-столбец. Также в модели и ее модификациях присутствует случайная составляющая, характеризующая положительное либо отрицательное влияние некоторого агента на другого,

случайно выбранного агента. Данная серия моделей реализована в программном продукте MathLab.

Простая конструкция такого семейства моделей с одной стороны несет в себе ряд преимуществ, которые заключаются в том, что модель легко рассчитывать на больших интервалах времени и в таких моделях очень легко понять какие нововведения приводят к каким последствиям в результатах работы модели. С другой стороны, из-за того, что модель является очень простой, она не учитывает и не может учесть очень большое количество атрибутов, которые присущи тем или иным обществам. В частности, абсолютно не понятно почему агенты либо хорошо, ибо плохо начинают относиться друг к другу. В рамках модели это определяется случайно. Для того, чтобы исправить этот недостаток, была разработана и исследована другая модель, построенная на абсолютно других принципах, в которой отношение агентов друг к другу определяется эндогенно на базе конкурентной борьбы за некоторый ограниченный ресурс.

2. Разработана и исследована агент-ориентированная модель общества с однородной социальной структурой. Изучен вопрос исчезновения популяции за счет внутривидовой конкурентной борьбы за ограниченный ресурс.

Во второй главе диссертации рассматривается новая модель, построенная на абсолютно иных принципах, нежели модели серии Соле-Манрубия. Если модель Соле-Манрубия и ее модификации строились на основе перемножения векторов и матриц, то новая модель сконструирована на базе агент-ориентированной парадигмы в программном продукте Microsoft Excel с помощью VBA. В этой модели, в отличие от моделей серии Соле-Манрубия появляются такое понятие, как ареал обитания и каждому агенту сопоставляется его местоположение на данном ареале.

Для всех агентов задаются правила перемещения и агенты находящиеся рядом могут взаимодействовать друг с другом. Кроме самих агентов в модели присутствует еще один важный атрибут в виде некоторого ресурса, который требуется каждому агенту для получения жизненной энергии. Такой ресурс может интерпретировать как пищу. Ареал представляет из себя квадратное поле размером dim на dim , каждая клетка которого может быть либо пустой, либо там может находиться агент, либо в ней может появиться ресурс. Время в модели дискретно.

Сюжетная линия этой модели разворачивается вокруг ресурса, которого на ареале по понятным причинам будет ограниченное количество. Соответственно отношение агентов друг к другу будет зависеть уже не от некоторого случайной величины, а от того насколько данного ресурса хватает каждому конкретному агенту в данный момент времени. В случае когда ресурса кому-то не хватает, то есть кто-то из агентов испытывает голод в отношении ресурса, тогда данный агент

начинает рассматривать других агентов в качестве конкурентов на ограниченный ресурс, что пробуждает в нем агрессивное поведение. В этом случае агенты могут начать убивать друг друга пока их количество не упадет до некоторого уровня, при котором ресурсов снова будет хватать на всех. Когда такая ситуация наступает, агенты рассматривают друг друга не в качестве конкурентов, а в качестве партнеров для продолжения рода и зачатия новых особей.

Таким образом, в каждом агенте заложено два инстинкта, определяющие логику его поведения. Первый инстинкт – инстинкт выживания, он становится активным в случае, когда агент не потреблял ресурс в течение определенного времени, другими словами в моменты времени, когда агент испытывает голод. Проявляется этот инстинкт в виде агрессии к другим агентам, которых он воспринимает в качестве конкурентов на ресурс. Второй инстинкт – инстинкт продолжения рода, либо инстинкт размножения. Возникает он в те моменты, когда агент сыт, в этом состоянии он ищет партнера для спаривания. Если поиски оказываются успешными и второй агент тоже находится в сытом состоянии, то происходит зачатие, в результате чего в следующем периоде появляется новый агент.

Построенная модель была изучена, проведена серия экспериментов, выявлены области значения параметров, при которых наблюдается та или иная качественная динамика развития популяции. В фокусе внимания данного исследования были такие параметры как размеры ареала и начальный уровень здоровья агентов. Вторым параметром характеризует уровень здоровья, с которым появляется на свет новый агент, в каждом прогоне модели значение этого параметра фиксировано для всех агентов. В частности обнаружено, что при небольших размерах ареала гибель всей популяции наступает достаточно быстро. Если размер ареала увеличить, то живучесть популяции заметно возрастает. При достаточно больших размерах ареала выявлено значение плотности населения на данном ареале, которое является инвариантом по отношению к параметру, отвечающему за размер ареала. То есть при достаточно больших размерах ареала в каждом эксперименте усредненная по времени плотность популяции в среднем будет равна некоторому значению, которое не зависит от размеров ареала. Под плотностью населения понимается величина, равная количеству агентов, деленному на площадь ареала.

При изучении параметра, отвечающего за начальный уровень здоровья, обнаружено некоторое оптимальное значение этого параметра, при котором живучесть популяции наиболее высока. Изменение как в большую, так и в меньшую сторону этого параметра приводит в среднем к снижению численности популяции.

3. Разработана и исследована модель с неоднородной социальной структурой – модель « кочевников» и « землепашцев» . Выявлены условия,

при которых наблюдается исчезновение одного из двух видов, а также условия, когда обе вида сосуществуют на едином ареале на протяжении наблюдаемого времени.

На следующем, заключительном этапе исследования в модель общества введен еще один атрибут, характеризующий разделение этого общества на два класса, которые условно были названы « кочевниками» и « землепашцами» . Представители каждого из данных классов характеризуются своей причастностью к процедуре воспроизводства продукта. Если землепашцы умеют его воспроизводить самостоятельно, затрачивая свой труд и увеличивая его урожайность, то у кочевников нет навыка воспроизводить дополнительного продукта, вместо этого они добывают продукт путем поиска его на ареале, в том числе и отбирая у землепашцев и иногда у других кочевников. Кроме продукта, который воспроизводят землепашцы (он же культурный ресурс), в данной модели, как и в предыдущей модели, есть также и дикий ресурс, который на ареале появляется самостоятельно. По своим характеристикам дикий у культурный ресурсы отличаться не будут.

Модель по своей конструкции очень похожа на предыдущую модель, в ней также присутствует ареал, ресурс и агенты. Аналогично, как и в предыдущей модели, в данной модели время дискретно, роль ареала обитания выполняет квадратное поле с ячейками размером $dim \times dim$. Каждая ячейка ареала может характеризоваться тремя состояниями – либо в данный момент в ней находится один из агентов, либо в ней появился ресурс, либо клетка в данный период времени пуста. Реализация модели осуществлена в программном комплексе AnyLogic.

Для данной модели рассмотрены различные модификации, проведена большая серия экспериментов, найдены области параметров, при которых наблюдается та или иная качественная динамика развития изучаемого сообщества. Кроме имитационного моделирования в данном разделе анализ полученных результатов проведен с применением методов статистики, регрессионного анализа, а также отдельно был применен вейвлет-анализ.

В рамках данного исследования интерес представляли не только ситуации, при которых наблюдается вымирание одного либо обоих видов агентов, но и ситуации, при которых наблюдается сосуществование обеих видов агентов. Второй вопрос представляет также большой интерес, как и первый.

Было изучено влияние таких параметров, как размер ареала и темп роста дико ресурса. Как и в предыдущей модели было выявлено, что при малой площади ареала с большой вероятностью наблюдается исчезновение одного из двух видов агентов. Как видно из рисунка 1, если размер ареала увеличивать, то число прогонов, при которых оба сообщества выживают за рассматриваемый период также будет

увеличиваться. При этом, при прочих равных увеличение площади ареала более выгодно для кочевников, нежели для землепашцев, тогда как небольшой размер ареала наиболее предпочтителен сообществу землепашцев. Также как и в предыдущей модели было обнаружено, что плотность агентов в каждом из сообществ является инвариантом по отношению к размерам ареала, при размерах этого ареала больше некоторого значения. Кроме этого был проведен регрессионный анализ, с помощью которого была обнаружена линейная зависимость между усредненным за все периоды количеством агентов каждого из видов и размера ареала.

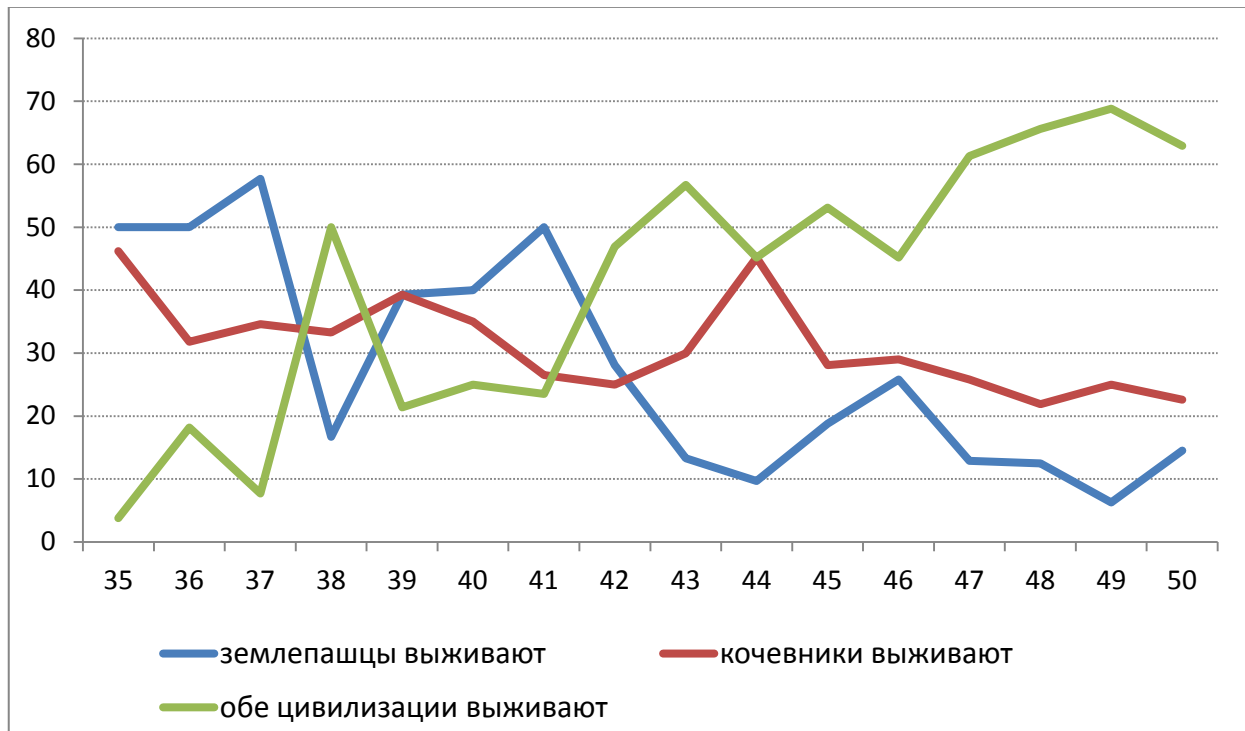


Рисунок 1. Процентное соотношение трех возможных исходов в зависимости от параметра d , который изменяется в диапазоне от 35 до 50

Исследование влияния параметра, отвечающего за темп роста дикого ресурса, также показало интересные результаты. Из рисунка 2 видно, что при низких темпах роста дикого ресурса с гораздо большей вероятностью, близкой к 100% будут выживать землепашцы. При больших значениях этого параметра наоборот, гарантированно выживают кочевники. При некоторых средних значениях темпа роста дикого ресурса практически всегда наблюдается сосуществование обоих видов агентов на изучаемом интервале времени.

Кроме основной модели была сконструирована ее модификация, в которой на агентов наложено дополнительное ограничение, связанное с возможностью передвигаться по ареалу. А именно, теперь агенты по горизонтали и по вертикали не могут удаляться от места своего рождения дальше некоторого заданного пара-

метра, название которого *radius*. То есть и кочевники и землепашцы как бы привязаны к месту своего рождения и дальше какого-то расстояния, равного для всех агентов, от этого места не отходят. Другими словами для каждого агента существует область в виде квадрата (либо прямоугольника, если он родился не далеко от границы ареала), за пределы которого он выходить не может.

Интуитивно понятно, что данное ограничение в большей степени ударит по кочевникам, нежели землепашцам, поскольку для кочевников возможность передвигаться по ареалу является гораздо более важным навыком, так как только с помощью этого навыка они могут находить больше ресурса, отбирая его у землепашцев либо натываясь на дикий ресурс. Для землепашцев навык к передвижению не так важен, поскольку они могут прокормить себя, находясь на очень ограниченном пространстве, самостоятельно выращивая ресурс.

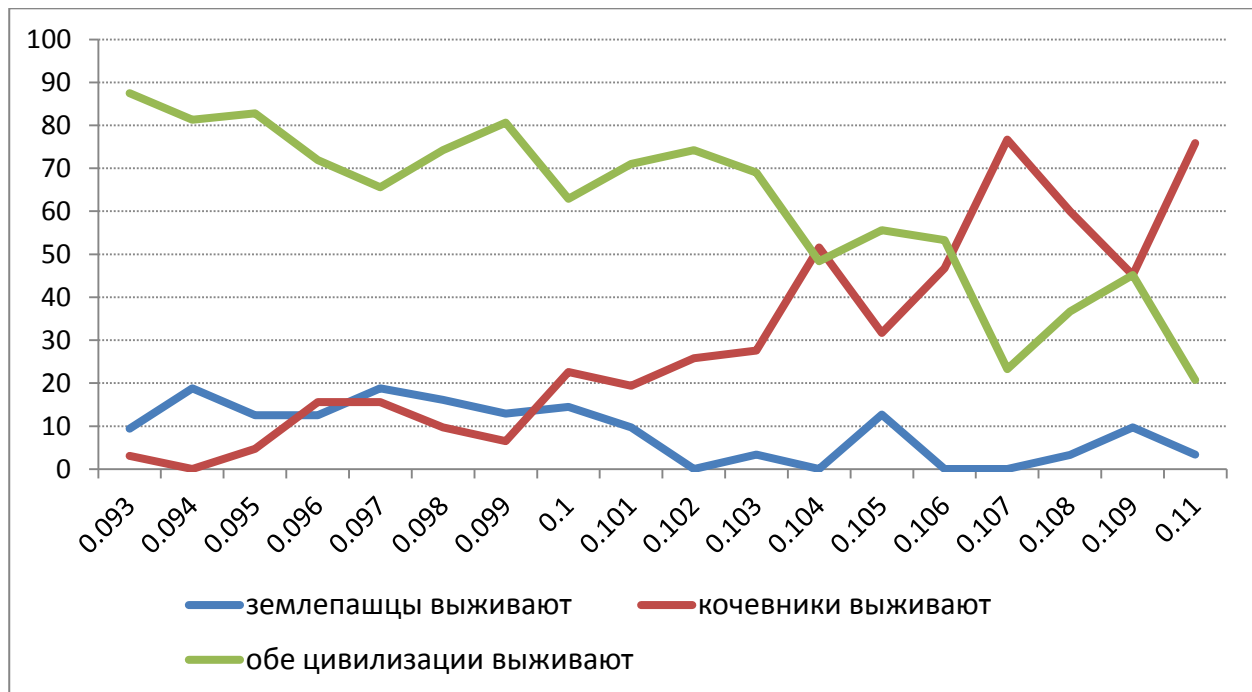


Рисунок 2. Процентное соотношение трех возможных исходов в зависимости от параметра темпа роста дикого ресурса

Понятно, что при слишком большом значении параметра *radius* наличие ограничений на перемещения равносильно отсутствию этих ограничений, т.к. агенты никогда не будут достигать границы той области, за которую им не разрешено уходить. Экспериментально было найдено такое значение параметра *radius*, при котором наличие рассматриваемых ограничений влияет на качественную динамику системы. Как и предполагалось из интуитивных соображений при достаточно малых значениях параметра *radius* за наблюдаемые временные рамки землепашцы никогда не вымирали, было зафиксировано либо сосуществование обоих видов

агентов, либо в некоторых случаях можно было видеть вымирание кочевников. При увеличении параметра radius вероятность исчезновения землепашцев начинает отличаться от нуля, но она заметно ниже вероятности вымирания кочевников. При дальнейшем увеличении данного параметра система начинает вести себя также, как и при отсутствии ограничения на перемещения.

Для лучшего понимания модели « кочевников» и « землепашцев» применим вейвлет-анализ к полученным экспериментальным данным. С помощью этого анализа осуществляется обработка временных рядов, суть которой в очищении этих рядов от высокочастотных колебаний, скорее всего не содержащих в себе много полезной информации. После того, как ко всем рядам была применена такая процедура, применяется регрессионный анализ. Временные ряды были взяты на основе одного из экспериментов протяженностью 20000 периодов модели « кочевников» и « землепашцев», в котором оба вида агентов сосуществуют на протяжении всего наблюдаемого времени. Для исследования были взяты временные ряды характеризующие динамику численности популяции землепашцев, кочевников и динамику количества ресурса на ареале как культурного, так и дикого в каждый момент времени. На первом шаге была построена регрессия относительно необработанных данных, в которой в роли зависимой переменной выступает численность землепашцев, а роли объясняющих переменных играют численность кочевников и количество ресурса. В результате применения метода наименьших квадратов к такой регрессии коэффициент детерминации для нее оказался равным $R^2 = 0,81$, тест Дарбина-Уотсона оказался на уровне $DW = 0,94$, что говорит о наличии положительной автокорреляции ошибок. Наличие в модели автокорреляции ошибок свидетельствует о том, что для прогнозирования данная модель не подходит в силу смещенности прогнозных значений, однако это не мешает судить о характере зависимостей исследуемых временных рядов.

На следующем этапе к исследуемым временным рядам было применено вейвлет преобразование на основе вейвлета Хаара глубиной разложения $N = 4$. Затем последовательно убираются самые самые высокочастотные составляющие временного ряда, после этого менее высокочастотные и т.д. В соответствии с глубиной разложения данная операция повторяется 4 раза. На каждой такой итерации строится регрессионная модель и осуществляется сравнение в данном случае 4 полученных моделей. В результате удаления самой высокочастотной составляющей изучаемых рядов получаем модель, коэффициент детерминации которой равен $R^2 = 0,86$, статистика Дарбина-Уотсона принимает значения $DW = 0,46$. Таким образом объясняющая способность модели увеличивается, тогда как автокорреляция ошибок усиливается. Далее, удаляем следующие по

высокочастотности составляющие, имеем $R^2 = 0,89$, $DW = 0,22$. На следующих двух шагах получаем $R^2 = 0,92$, $DW = 0,095$ и $R^2 = 0,93$, $DW = 0,045$. Тенденция налицо – удаление каждой следующей высокочастотной составляющей временного ряда приводит к увеличению коэффициента детерминации модели при одновременном снижении статистики Дарбина-Уотсона. Другими словами, объясняющая способность модели увеличивается, тогда как автокорреляция ошибок только усиливается.

На следующем шаге вместо вейвлета Хаара применим вейвлет Добеши порядка 2. Последовательность действий будет такая же, как и при использовании вейвлета Хаара. Качественно были получены такие же результаты. При удалении самых высокочастотной составляющей сигналов оценка регрессионной модели дала $R^2 = 0,86$ и $DW = 0,40$. На следующей итерации имеем $R^2 = 0,89$ и $DW = 0,13$. На заключительных двух шагах получаем – $R^2 = 0,92$, $DW = 0,04$ и $R^2 = 0,93$, $DW = 0,01$. Видно, что так же как и в случае с вейвлетом Хаара коэффициент детерминации растет при одновременном снижении значений статистики Дарбина-Уотсона. При применении других вейвлетов эта тенденция остается неизменной. Любопытно, что вейвлет Хаара оказался самым лучшим среди остальных вейвлетов, для которых эта операция проводилась.

В результате проведенного анализа можно сделать выводы, что численность кочевников и количество ресурса достаточно хорошо объясняют численность землепашцев в каждый момент времени. Применение вейвлет-анализа позволяет увеличить объясняющую способность модели, а также позволяет получить уточненные значения соответствующих коэффициентов регрессии. Тем не менее, вейвлет-анализ не избавляет модель от наличия автокорреляции ошибок, более того, ситуация в этом смысле становится только хуже. Из этого можно сделать вывод, что численность кочевников и количество ресурса на ареале содержит в себе не всю информацию о численности землепашцев в каждый момент времени.

III. РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

В рамках диссертационного исследования были получены следующие результаты:

1. Разработаны имитационные модели, являющиеся модификациями модели Соле-Манрубиа. Определены условия, при которых наблюдается эффект вымирания популяций в этих моделях.

В модификации с введенным фактором мести вымирание популяции наблюдаются во всех проведенных экспериментах. В модели с введенной асимметрией во взаимоотношениях между агентами определено значение параметра асимметрии, при котором за отведенной в рамках экспериментов время можно наблюдать вымирание популяции.

2. На основе модели Соле-Манрубиа построена её экономическая модификация, роль агентов в которой выполняют экономические субъекты – домохозяйства и фирмы.

Проведена серия экспериментов, построена частота разорений экономических субъектов. Показано, что в замкнутом экономическом пространстве возможны ситуации, при которых кризисы (одновременное разорение большого числа агентов) могут наступать не только в результате некоторого внешнего воздействия, но и за счет внутренних причин.

3. Разработана агент-ориентированная социально-экономическая модель, агенты которой наделены большей субъектностью в процессе принятия решений.

Построена агент-ориентированная модель, в которой взаимодействие между агентами построено на основе конкурентной борьбы за ограниченный ресурс. Проведена серия экспериментов, выявлены области параметров модели, при которых наблюдается вымирание рассматриваемой популяции, а также области параметров, при которых популяция выживает за отведенное в рамках экспериментов время.

4. Разработана агент-ориентированная социально-экономическая модель с неоднородной социальной структурой – модель « кочевников» и « землелашцев» . Представлены различные модификации данной модели.

Проведена серия экспериментов, определены области параметров, при которых за отведенное время происходит исчезновение одного из видов агентов, а также области параметров, при которых можно наблюдать сосуществование на едином ареале обоих видов агентов. Выявлена пространственная локализация кочевников и землелашцев. Приведена модификация этой модели, которая учитывает

ограничения агентов на способность перемещаться по ареалу. Проведен анализ этой модификации, который показал, что данное ограничение положительно влияет на землелашцев и оказывает негативное влияние на кочевников. Проведен количественный анализ влияния этого ограничения.

5. Представлен статистический, регрессионный и вейвлет-анализ данных, полученных в результате осуществления серии экспериментов модели « кочевников» и « землелашцев» .

Осуществлена проверка статистической гипотезы о наличии инварианта, характеризующего неизменность плотности заселения агентов каждого из типов по отношению к изменению размеров ареала. Представлена серия регрессионных моделей, с помощью которых выявлена зависимость некоторых характеристик модели от ряда параметров модели. В частности, показана линейная связь усредненной численности землелашцев и кочевников от размеров ареала. Также представлен вейвлет-анализ временных рядов динамики численности каждого из видов, а также количества ресурса на ареале обитания в каждый момент времени. Определена функциональная линейная зависимость между этими временными рядами, благодаря применению вейвлет-анализа объясняющая способность построенной регрессионной модели была повышена.

Главная идея диссертационной работы заключается в изучении каждого из рассмотренных в работе эффектов в отдельности, для получения четкого понимания какой эффект приводит к каким результатам. В качестве альтернативного пути для изучения поставленных вопросов можно было бы предложить с самого начала строить достаточно сложные модели общества, возможно более приближенные к реальному современному либо существовавшему ранее обществу, и изучать такие модели. По такому пути пошли авторы работ, в которых рассматривались цивилизация Маяя (Scott Heckbert, 2013), племена охотников и собирателей (hunter-gatherer groups), обитавших в северном Гуджарате (Индия) (Balbo A.L., 2014), а также авторы многих других моделей (Kohler T.A, 2007; Wilkinson T. J., 2007; Santos J.I., 2015). При построении сложной модели формализация многих аспектов в такой модели часто носит спорный характер и зачастую имеется множество равноценных с точки зрения здравого смысла альтернатив для такой формализации. Если модель действительно сложная, то таких спорных моментов в ней может оказаться достаточно много. В итоге, когда модель построена и в ней наблюдается какой-то интересный эффект, не всегда можно понять, этот эффект носит объективный характер, отражающий суть моделируемого процесса, либо этот эффект носит субъективный характер, обусловленный особенностями выбранной формализации, и суть моделируемого процесса не отражает. Кроме этого модель, в которых сделана

попытка учесть очень много факторов, может оказаться сложным объектом для исследования, поскольку те или иные наблюдаемые эффекты будут следствием наложения многих факторов, из-за чего выявление влияния каждой из таких факторов в отдельности может оказаться неподъемной задачей. В связи с этим стратегия, выбранная в рамках данной диссертационной работы, заключается в движении от самых простых моделей (моделей типа Соле-Монрубия) к более сложным (модель «кочевников» и «землеашцев»), в этом случае новые эффекты, возникающие при каждом новом усовершенствовании модели будут достаточно легко вычленимы и анализируемы. Понятно, что проделанные в рамках данной диссертационной работы шаги могут рассматриваться как первые шаги в достаточно долгом и интересном исследовании на пути дальнейшего усовершенствования моделей и более глубокого понимания процессов, происходящих в сообществах с более сложной социальной организацией.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Работы, опубликованные в изданиях, рекомендованных ВАК при Министерстве образования и науки Российской Федерации

- [1] Белоусов Ф.А. Анализ модели Хёнинга и ее модификации // Аудит и финансовый анализ. 2014. №1. С. 319–323.
- [2] Белоусов Ф.А. Модель сообществ с двумя способами воспроизводства продукта (модель «кочевников» и «землепашцев») // Экономика и математические методы. 2017. Т. 53. № 3. С. 93–109.
- [3] Белоусов Ф.А. Вейвлет-анализ временных рядов в модели кочевников и землепашцев // Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий. 2018. №1. с. 288-297.
- [4] Белоусов Ф.А. Модель «кочевников» и «землепашцев» с ограниченным ресурсом пространственного перемещения // Экономика и математические методы. 2018. Т. 54. № 4. С. 124–131.

Другие работы автора

- [5] Бекларян Л.А., Макаров В.Л., Белоусов Ф.А. Устоявшиеся режимы в модели Хёнинга и ее модификациях // Машинное обучение и анализ данных. 2014. Т. 10. С. 1385–1395. (РИНЦ)
- [6] Белоусов Ф.А. Исследование цивилизаций с двумя различными способами воспроизводства продукта. Агент-ориентированная модель «кочевников» и «землепашцев» // Вестник ЦЭМИ. 2018. № 4. (РИНЦ)
- [7] Белоусов Ф.А. Модель Хёнинга и ее модификации. Стандартные режимы модели // Труды X Международной конференции «Применение многомерного статистического анализа в экономике и оценке качества» (26–28 августа 2014 г.). М.: НИУ ВШЭ, ЦЭМИ РАН, 2014.
- [8] Белоусов Ф.А. Модель «кочевников» и «землепашцев»: агент-ориентированное моделирование цивилизации с двумя способами воспроизводства продукта // Международная конференция «XXVII Крымская Осенняя Математическая Школа-симпозиум по спектральным и эволюционным задачам» (КРОМШ-2016), 17–29 сентября 2016 г. Симферополь: КФУ им В.И. Вернадского, 2016. С. 79–80.
- [9] Белоусов Ф.А., Истратов В.А. Агент-ориентированная модель распространения доверия в обществе // Тезисы доклада XIII Международная научной конференция «Теория операторов, комплексный анализ и математическое моделирование», 7–14 сентября 2016 г. Владикавказ: ЮМИ ВНЦ РАН, 2016.
- [10] Белоусов Ф.А., Истратов В.А., Шевгунов Т.Я., Бекларян А.Л. Модель распространения доверия в обществе: влияние начального расположения агентов на динамику распространения доверия в обществе // Международная конференция посвященная 100-летию со дня рождения Селима Григорьевича Крейна, 13–19 ноября 2017 г. Воронеж: ВГУ, МГУ, МИАН, 2017. С. 49–50.
- [11] Белоусов Ф.А. Применение вейвлет-преобразований для анализа временных рядов на классе моделей взаимодействия «кочевников» и «землепашцев» // IX Московская международная конференция по Исследованию Операций (ORM2018-Germeyer100), 22–27 октября 2018 г. Москва, Россия.

Белоусов Федор Анатольевич

**МОДЕЛИ СОЦИАЛЬНО-ЭКОНОМИЧЕСКИХ
И ДЕМОГРАФИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ СООБЩЕСТВ
С ПРОСТЕЙШЕЙ СОЦИАЛЬНОЙ СТРУКТУРОЙ**

Специальность 08.00.13 – Математические
и инструментальные методы экономики

АВТОРЕФЕРАТ

Диссертации на соискание ученой степени
кандидата экономических наук

Подписано в печать 26.06.2019 г.
Формат 60×90/16. Печ. л. 1,0. Тираж 80 экз. Заказ №14
ФГБУН Центральный экономико-математический институт РАН
117418, Москва, Нахимовский пр-т, 47
Тел. 8 (499) 724-21-39
E-mail: ecr@cemi.rssi.ru
<http://www.cemi.rssi.ru/>
