

УДК: 331.524

Моделирование динамики численности занятого населения в отраслях экономики: агент-ориентированный подход

М. Ю. Хавинсон^а, А. Н. Колобов^б

Институт комплексного анализа региональных проблем
Дальневосточного отделения Российской академии наук,
Россия, 679016, г. Биробиджан, ул. Шолом-Алейхема, д. 4

E-mail: ^а havinson@list.ru, ^б alex_0201@mail.ru

*Получено 31.05.2018, после доработки — 28.09.2018.
Принято к публикации 28.09.2018.*

Статья посвящена моделированию динамики численности занятого населения по отраслям экономики как на национальном, так и на региональном уровне. Отсутствие целевого распределения работников в рыночной экономике требует исследования системных процессов на рынке труда, приводящих к различной динамике численности занятых в отраслях экономики. В этом случае значимыми становятся личные стратегии выбора трудовой деятельности экономическими агентами. Наличие различных стратегий приводит к появлению страт на рынке труда с динамично изменяющейся численностью занятых, неравномерно распределенной между отраслями экономики. В результате этого могут наблюдаться нелинейные колебания численности занятого населения, для исследования которых релевантен инструментарий агент-ориентированного моделирования. В статье на примере Еврейской автономной области рассмотрены синхронные и противофазные колебания численности занятых по видам экономической деятельности, обнаруженные во временных рядах статистических данных для 2008–2016 гг. Показано, что такие колебания наблюдаются по возрастным группам работников. Ввиду этого выдвинута гипотеза о том, что агент на рынке труда при выборе места работы руководствуется стратегией, характерной для его возрастной группы, что в итоге прямо влияет на распределение численности занятых различных когорт и общую численность занятых в отраслях экономики. При этом стратегия определяется исходя из социально-экономических характеристик отраслей (различного уровня оплаты труда, условий труда, престижа профессии). Для проверки гипотезы построена базовая агент-ориентированная модель трехотраслевой экономики, в которой учтены различные стратегии экономических агентов, включающие выбор наибольшей заработной платы, наиболее высокого престижа профессии и наилучших условий труда. В результате численных экспериментов показано, что наличие различных стратегий выбора отрасли в совокупности с возрастными предпочтениями работодателей внутри отрасли приводит к периодическим и сложным режимам динамики численности разновозрастных занятых. Такие возрастные предпочтения могут быть вызваны, например, требованием работодателя к наличию трудового стажа и образования. Также существенные изменения возрастной структуры занятого населения могут возникнуть вследствие миграции.

Ключевые слова: занятое население, отрасли экономики, агент-ориентированное моделирование, нелинейная динамика

UDC: 331.524

Modeling of population dynamics employed in the economic sectors: agent-oriented approach

M. Yu. Khavinson^a, A. N. Kolobov^b

Institute for Complex Analysis of Regional Problems Far Eastern Branch Russian Academy of Sciences,
4 Sholom-Aleikhem st., Birobidzhan, 679016, Russia

E-mail: ^a havinson@list.ru, ^b alex_0201@mail.ru

Received 31.05.2018, after completion – 28.09.2018.

Accepted for publication 28.09.2018.

The article deals with the modeling of the number of employed population by branches of the economy at the national and regional levels. The lack of targeted distribution of workers in a market economy requires the study of systemic processes in the labor market that lead to different dynamics of the number of employed in the sectors of the economy. In this case, personal strategies for choosing labor activity by economic agents become important. The presence of different strategies leads to the emergence of strata in the labor market with a dynamically changing number of employees, unevenly distributed among the sectors of the economy. As a result, non-linear fluctuations in the number of employed population can be observed, the toolkit of agent-based modeling is relevant for the study of the fluctuations. In the article, we examined in-phase and anti-phase fluctuations in the number of employees by economic activity on the example of the Jewish Autonomous Region in Russia. The fluctuations found in the time series of statistical data for 2008–2016. We show that such fluctuations appear by age groups of workers. In view of this, we put forward a hypothesis that the agent in the labor market chooses a place of work by a strategy, related with his age group. It directly affects the distribution of the number of employed for different cohorts and the total number of employed in the sectors of the economy. The agent determines the strategy taking into account the socio-economic characteristics of the branches of the economy (different levels of wages, working conditions, prestige of the profession). We construct a basic agent-oriented model of a three-branch economy to test the hypothesis. The model takes into account various strategies of economic agents, including the choice of the highest wages, the highest prestige of the profession and the best working conditions by the agent. As a result of numerical experiments, we show that the availability of various industry selection strategies and the age preferences of employers within the industry lead to periodic and complex dynamics of the number of different-aged employees. Age preferences may be a consequence, for example, the requirements of employer for the existence of work experience and education. Also, significant changes in the age structure of the employed population may result from migration.

Keywords: employed population, branch of economy, agent-oriented modeling, nonlinear dynamics

Citation: *Computer Research and Modeling*, 2018, vol. 10, no. 6, pp. 919–937 (Russian).

1. Введение

Колебательные и сложные режимы динамики социально-экономических систем до сих пор являются недостаточно изученными, а их содержательные интерпретации — дискуссионными [Капица и др., 2003]. Выявляются новые феноменологические закономерности в социально-экономических временных рядах [Андреев и др., 2017; Логинов и др., 2017; Эконофизика... , 2007], одной из которых являются структурные колебания численности занятого населения в разрезе возрастных групп. Моделирование этих колебаний позволило объяснить возникающие динамические режимы численности разновозрастных занятых фактором взаимодействия занятых, например, в виде взаимной помощи (партнерства) или конкуренции [Хавинсон и др., 2016]. Как было показано в работах [Хавинсон и др., 2016; Хавинсон, Кулаков, 2015], феноменологически режимы динамики взаимодействующих возрастных групп и биологических популяций довольно схожи, поэтому динамику изменения численности разновозрастных занятых удалось описать соответствующими биофизическими моделями. Однако если для биологических популяций типа «хищник – жертва» механизм возникновения периодических колебаний концептуально понятен [Ризниченко, Рубин, 2004], то для взаимодействия разных возрастных групп он остался неясным. При этом, как можно полагать, фундаментально колебания численности биологических популяций и численности занятых имеют единую природу, связанную с самоорганизацией живых систем [Prigogine, Stengers, 1984; Haken, 1977]. Структура этих систем такова, что в них выделяются группы объектов с одинаковыми характеристиками (например, вид популяции и возраст занятого) [Шлюфман и др., 2017; Frisman et al., 2011]. Взаимодействия этих групп приводят не только к изменению численности групп, но и к изменению совокупной численности. При этом для всех этих объектов весьма важной оказывается стратегия, которая описывает соответствующее поведение каждой особи или каждого агента. И если для биологической популяции важно выживание, которое обуславливается экологическими условиями, питанием и размножением [Фрисман и др., 2010; Ризниченко, Рубин, 2004], то в социальной среде полноценное существование обеспечивается более разнообразным и сложным набором факторов. Иными словами, целевая функция поведения агента на рынке труда содержит большее число факторов и, вероятнее всего, является функционально более сложной. Взгляд на биологические и социальные процессы с точки зрения отдельного объекта приводит к необходимости анализа стратегий поведения, т. е. целевых функций агентов, реализованных в соответствующих алгоритмах взаимодействия с другими агентами.

Исследовать, как стратегии поведения занятого населения влияют на его структуру и общую численность занятых, можно на основе агент-ориентированного подхода [Макаров и др., 2016; Маковеев, 2016; Kolobov, Frisman, 2016; Колобов, 2014; Gilbert, 2008]. Мы полагаем, что настоящее исследование представляет ценность как в фундаментальном, так и в прикладном аспекте. Предметное изучение сложных режимов динамики, наблюдающихся в базовых моделях и в статистических данных, может в дальнейшем пролить свет на новые фундаментальные аспекты самоорганизации живых систем. В практическом плане становится возможным разработать более точный инструментальный прогнозирования социально-экономического поведения населения, что позволит более эффективно решать задачи, связанные с дисбалансом спроса и предложения на рынке труда, как в национальном, так и в региональном масштабах.

2. Колебания численности разновозрастных занятых в статистических данных

На наш взгляд, дальнейшее исследование стратегий поведения занятого населения, которое влияет на формирование колебательной динамики, должно быть связано с перетоками занятых

между отраслями экономики региона. Сами же стратегии могут быть «привязаны» к возрастным группам как к социально-экономическим агентам, имеющим относительно однородные социальные мотивы поведения. Данное предположение нашло подтверждение в статистических данных. Мы проанализировали временные ряды численности занятого населения по видам экономической деятельности в регионах. Для этого были рассмотрены соответствующие статистические данные отдельных субъектов РФ от наиболее развитых (например, г. Москва, г. Санкт-Петербург) до наименее развитых (в частности, Еврейская автономная область). В результате корреляционного анализа обнаружено, что наиболее заметные колебания в динамике численности занятого населения по видам экономической деятельности наблюдаются в основном в трудодефицитных регионах. На рис. 1 представлен пример двух регионов (Новосибирская область и Хабаровский край), для которых наблюдается не только колебательная динамика рассматриваемого показателя в целом, но и значимая корреляционная связь между этими колебаниями в регионе.

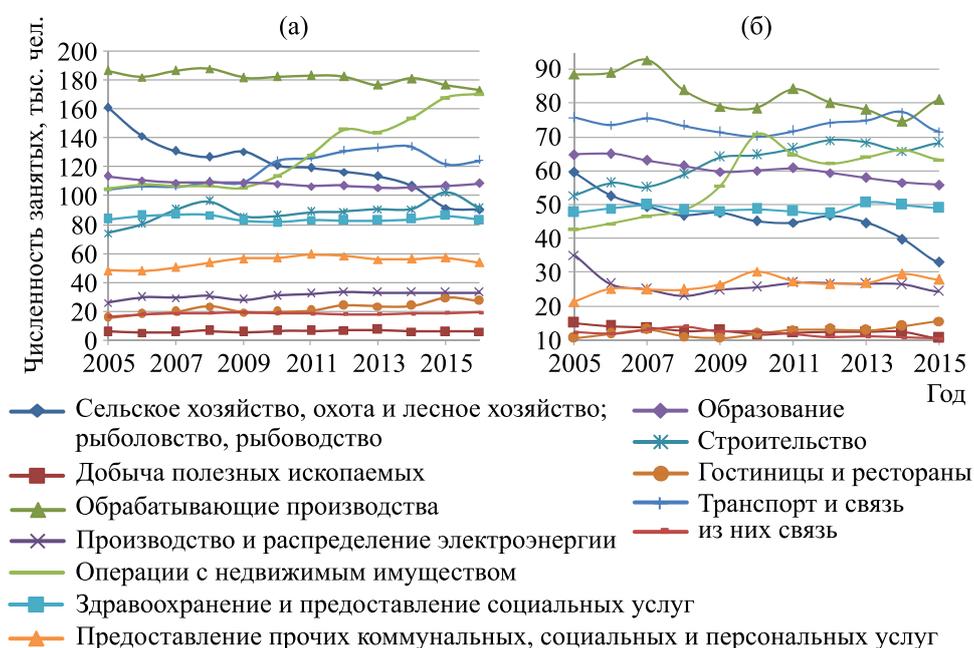


Рис. 1. Колебания численности занятого населения: а) Новосибирская область; б) Хабаровский край. Цветная версия рисунка доступна на сайте журнала

Более подробно нами рассмотрено распределение численности занятого населения по возрастам и видам экономической деятельности для Еврейской автономной области (ЕАО). Соответствующие статистические данные по ЕАО представлялись подходящими для подтверждения гипотезы о возможных колебаниях в численности занятых по возрастам и видам экономической деятельности, поскольку ЕАО является регионом с ярко выраженным дефицитом трудовых ресурсов [Мишук, Калинина, 2017; Соловченков, 2014; Калинина, Комарова, 2013]. Для демонстрации наличия таких колебаний приведена численность занятых (общая и с разбивкой по возрастным группам), а также динамика среднего возраста занятых в отдельных видах экономической деятельности [Труд и занятость... , 2017]. Интересно, что если в сельском хозяйстве, охоте и лесном хозяйстве колебания численности занятого населения по возрастным группам в целом синхронны (рис. 2), то в обрабатывающих производствах (рис. 3), а также в оптовой и розничной торговле, ремонте автотранспортных средств, мотоциклов, бытовых изделий и предметов личного пользования (рис. 4) наблюдаются противофазные колебания численности разновозрастных занятых. Также проведенный корреляционный анализ подтвердил, что перетоки между видами экономической деятельности часто наблюдаются для отдельных возрастных групп (рис. 5).

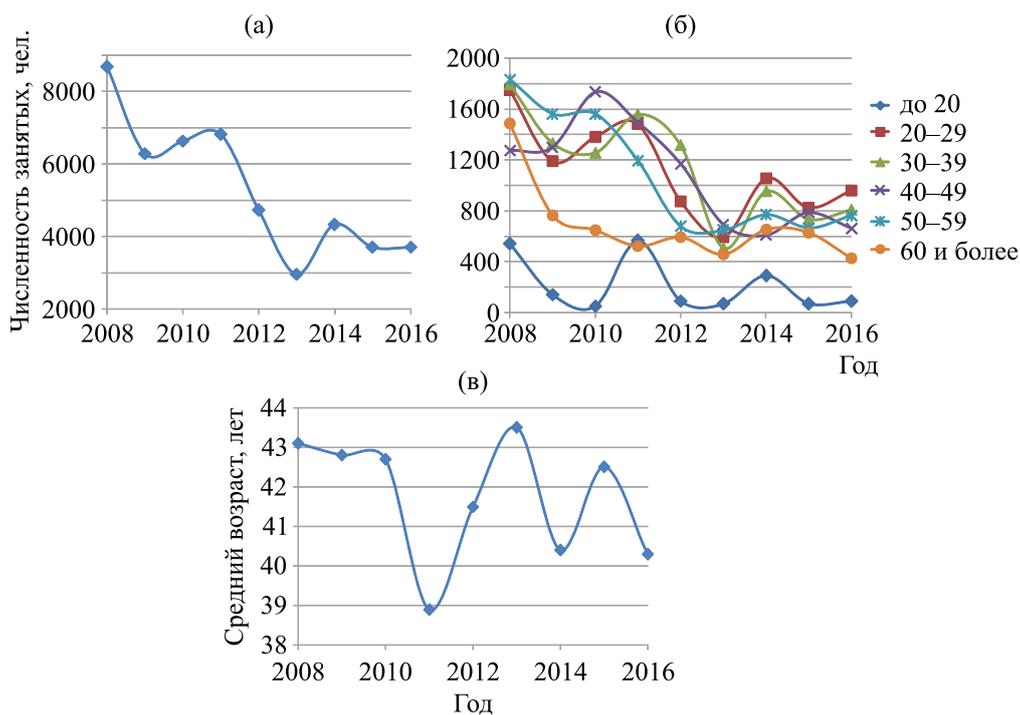


Рис. 2. Колебания численности занятых в сельском хозяйстве, охоте и лесном хозяйстве ЕАО: а) общая численность; б) численность по возрастным группам; в) средний возраст. Цветная версия рисунка доступна на сайте журнала

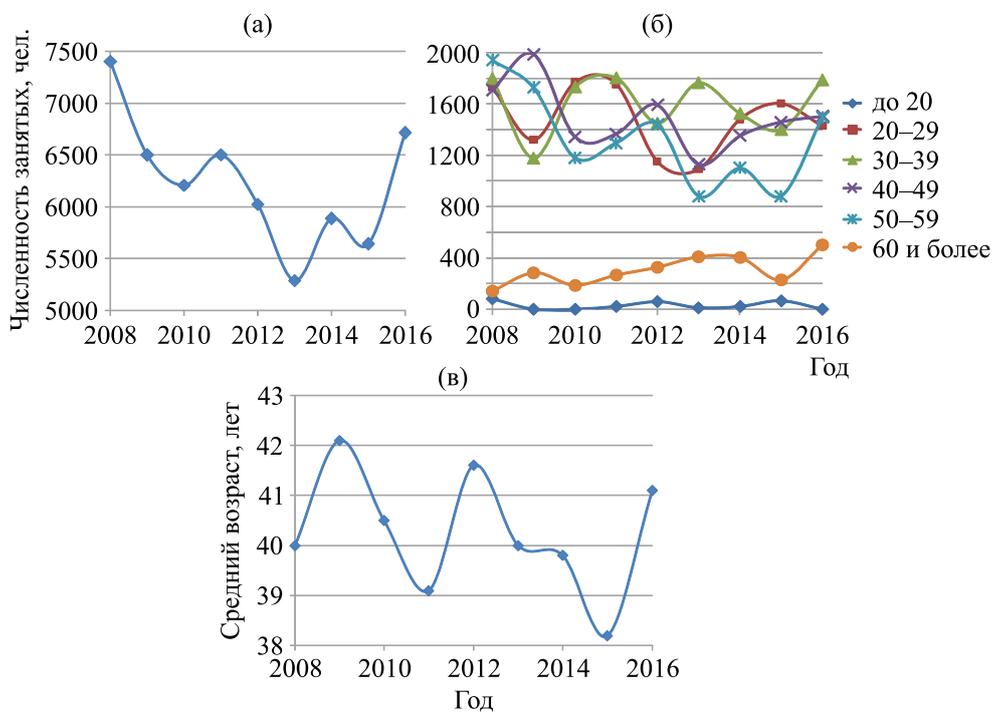


Рис. 3. Колебания численности занятых в обрабатывающих производствах ЕАО: а) общая численность; б) численность по возрастным группам; в) средний возраст. Цветная версия рисунка доступна на сайте журнала

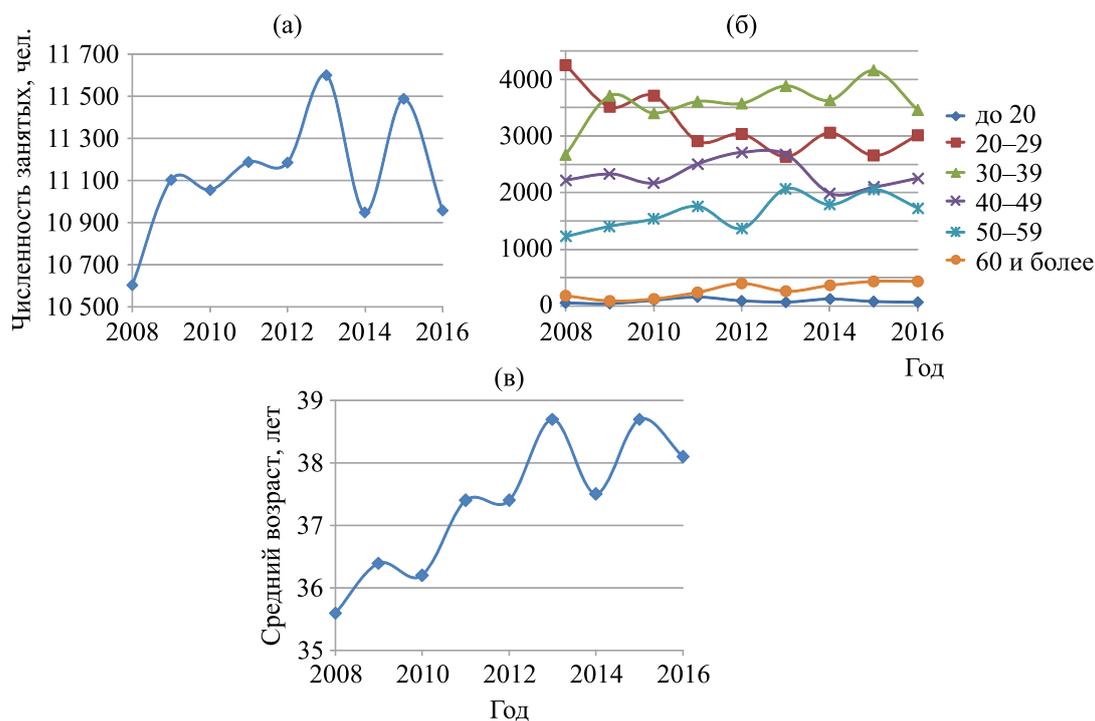


Рис. 4. Колебания численности занятых в оптовой и розничной торговле; ремонте автотранспортных средств, мотоциклов, бытовых изделий и предметов личного пользования ЕАО: а) общая численность; б) численность по возрастным группам; в) средний возраст. Цветная версия рисунка доступна на сайте журнала



Рис. 5. Численность занятых 20–29 лет в отдельных видах экономической деятельности в ЕАО (коэффициент корреляции -0.848)

Как видно из рис. 2–4, динамику возрастной структуры работников в отрасли хорошо отражает показатель среднего возраста занятых. При этом наличие колебательных режимов в различных видах экономической деятельности Еврейской автономной области свидетельствует о системном характере этого явления.

Таким образом, действительно можно полагать, что существуют некоторые стратегии (модели поведения на рынке труда) разновозрастных занятых, определяющие перетоки между видами экономической деятельности и прямо влияющие на возрастной состав занятых по видам экономической деятельности. Следует отметить, что на эти стратегии могут влиять работодате-

ли, задающие возрастной «фильтр» (например, наличие высшего образования у трудоустраивающихся подразумевает возраст (в большинстве случаев) старше 22 лет; дополнительные требования, касающиеся опыта работы, косвенно еще больше сдвигают возрастную планку); кроме того, частью социально-экономического поведения может являться миграция («вымывание») отдельных возрастных групп.

Для того чтобы исследовать, как различные стратегии трудоустройства работников могут влиять на динамику численности занятых, была построена базовая агент-ориентированная модель.

3. Описание агент-ориентированной модели, результаты численных экспериментов

Согласно неоклассической экономической теории экономический агент (в данном случае — занятый) на рынке труда должен действовать так, чтобы максимизировать свою прибыль. В дальнейших исследованиях однокритериальный поиск работы агентом на рынке труда был расширен до двухкритериального: предполагалось, что агент, кроме максимизации дохода, стремится минимизировать риски (например, трудоустраивающийся оценивает свои шансы не быть уволенным вследствие сокращения) [Mortensen, 1994; Pissarides, 1994]. Кроме того, для описания динамики реального рынка труда были введены модификации, учитывающие разный уровень квалификации [Albrecht et al., 2003], разные требования к профессиональным навыкам [Stavrunova, 2007], уровень образования [Dolado et al., 2009] и т. д. Дальнейший шаг детализации моделей рынка труда привел к учету пространственного распределения агентов на основе агент-ориентированного подхода [Wozniak, 2016]. Основной целью исследования таких моделей являлось формирование продуктивной политики по снижению безработицы.

В дальнейшем в экономической теории были введены дополнительные допущения, касающиеся стратегии агента, который стремится не только к максимизации прибыли, но и к удовлетворению своих социальных потребностей [Комаровская, 2016; Чернавский и др., 2011; Akerlof, Shiller, 2009; Becker, 1978; Simon, 1957]. При этом колебательные режимы в моделях рассматривались как следствие действия экзогенных факторов (например, смены технологий) в сочетании со стохастическими процессами в экономике. Также следует отметить, что в классической экономической теории предполагается согласованность между доходом и социальными характеристиками агентов. Вероятно, при таких экономических реалиях классические модели хорошо согласовались бы с реальными данными, однако в современной российской экономике такие условия зачастую не наблюдаются [Антоненко, 2013]. Еще одним важным аспектом моделирования рынка труда является предположение о единственности рыночного равновесия, что связано с однокритериальным выбором агента. Согласно неоклассическим моделям повышение спроса на труд над предложением в одной из отраслей приведет к увеличению заработной платы в этой отрасли, что и определит поведение работников, а затем и ликвидацию недостатка рабочей силы. Изучение поведения рынков методами нелинейной динамики привело к альтернативной концепции, в частности к эконофизике, в исследованиях которой показано, что развитие реальных экономических систем не противоречит допущению о множественности рыночного равновесия [Эконофизика. . . , 2007; Чернавский и др., 2011]. Во многом нелинейное поведение рынков связывают со сложными стратегиями поведения (многокритериальным выбором) его участников [Wozniak, 2016]. При этом следует подчеркнуть, что нелинейные модели экономики и, в частности, рынка труда сводятся к неоклассическим в случае близости к состоянию равновесия спроса и предложения.

Ввиду вышеизложенного в предложенной нами модели для объяснения наблюдаемых колебаний численности занятых мы рассматриваем, во-первых, наиболее общую ситуацию на рынке труда, включающую гетерогенность как отраслей, так и стратегий поведения, во-вторых, выбор

как детерминированный процесс. В данную версию модели включены три критерия, которые, по нашему мнению, комплексно описывают стратегии с учетом экономического и социального факторов, а также индивидуальных предпочтений работника. Алгоритм построения модели позволяет рассматривать эти факторы обобщенно как многокритериальный выбор, что достаточно для достижения цели исследования, но для большей определенности мы обозначим экономический фактор как заработную плату, социальный фактор — как престиж профессии, а индивидуальные предпочтения работника — как условия труда, связанные с непосредственной деятельностью и с предоставляемыми социальными гарантиями. Как было показано выше, колебания численности занятых наблюдаются в разных возрастных группах, поэтому стратегии поведения агентов рассмотрены в разрезе когорт. В целом наличие «возрастного» поведения довольно понятно и связано как с психологическими, так и с социальными аспектами, выражающимися в уровне образования, опыте работы, наличии семьи и детей, что также можно обобщенно рассматривать в «привязке» к возрасту [Васильева, 2017; Потанина, 2016; Чередниченко, 2015]. Также отметим, что данная модель является упрощенной и построена для выявления фундаментальных механизмов возникновения колебаний, наблюдаемых в реальных системах. Для разработки соответствующей модели конкретной социально-экономической системы требуется детальный учет множества дополнительных факторов, которые неизбежно будут действовать в совокупности и приводить к суперпозиции колебаний, вызванных разными факторами. Это, на наш взгляд, затруднит проверку гипотезы о влиянии стратегий занятых на исследуемую колебательную динамику.

Нами была смоделирована гипотетическая социально-экономическая система с занятым населением различных возрастов; занятые распределяются по трем условным отраслям экономики и с течением времени переходят из одной отрасли в другую.

В данной модели выделены шесть возрастных групп занятых (агентов): 16–23 лет, 24–31 лет, 32–39 лет, 40–47 лет, 48–55 лет, 56–63 лет. На каждый возраст с шагом 1 год приходится по три агента, что составляет 144 агента. Нами эмпирически определено, что такая численность агентов достаточна для описания колебательной динамики. У представителей каждой возрастной группы есть стратегия движения по отраслям с целью максимизации одного из трех параметров: зарплаты, престижа или условий труда. Каждая отрасль оценена по трехбалльной шкале (*A* — наивысший класс, *B* — средний класс, *C* — низкий класс), исходя из величины зарплаты, уровня престижа и условий труда. Оценки выбраны таким образом, чтобы каждая отрасль лидировала только по одному показателю (таблица 1). Представляло интерес, как будут распределяться численности занятых по отраслям в результате реализации групповых стратегий и «вымывания» численности занятых отдельных возрастных групп (как уже было указано выше, такой эффект может создать, в частности, миграция населения).

Рассматривались шесть стратегий выбора отрасли, которые подразделяются на чистые и смешанные (таблица 2). Чистые стратегии (1–3) заключаются в стремлении занятого максимизировать один показатель: зарплату, престиж или условия труда. Смешанные стратегии (4–6) заключаются в желании агента выбрать отрасль, максимально удовлетворяющую двум критериям: зарплате и престижу, зарплате и условиям труда, престижу и условиям труда. Также полагается, что для каждой возрастной группы занятых характерна одна стратегия поведения. Перемещение работников между отраслями осуществляется через определенный промежуток времени исходя

Таблица 1. Оценки каждой отрасли по трехбалльной шкале, исходя из зарплаты, уровня престижа и условий труда

Критерии	1 отрасль	2 отрасль	3 отрасль
зарплата	<i>A</i>	<i>B</i>	<i>C</i>
престиж	<i>B</i>	<i>C</i>	<i>A</i>
условия труда	<i>C</i>	<i>A</i>	<i>B</i>

Таблица 2. Стратегии агентов по выбору отрасли

Стратегии движения по отраслям	Возрастная группа	Первый шаг (отрасль)	Второй шаг (отрасль)	Третий шаг (отрасль)
1 – повышение зарплаты	32–39	3	2	1
2 – повышение престижа	24–31	2	1	3
3 – улучшение условий труда	16–23	1	3	2
4 – з/п + престиж	48–55	2 или 3	1	—
5 – з/п + усл. труда	40–47	3 или 1	2	—
6 – престиж + усл. труда	56–63	1 или 2	3	—

из выбора и реализации конкретной стратегии. Например, агенты, принадлежащие к группе 32–39 лет, стремятся максимизировать зарплату (стратегия 1). Для этого они последовательно перемещаются в первую отрасль, которая имеет наибольшее значение данного показателя по сравнению с остальными.

Таким образом, алгоритм агент-ориентированной модели можно записать в следующем виде.

1. Заполняем массив с агентами для каждой отрасли (таблица 3).
2. Задаем значение T – прогнозный период моделирования (с шагом один год).
3. Рассматриваем первого агента.
4. Если возраст агента больше A_{\max} (в данном случае $A_{\max} = 63$), то замещаем его на A_{\min} – летнего агента (A_{\min} не обязательно должен быть минимальный возраст, это может быть любое значение, меньшее A_{\max}).
5. Если агент перешел в следующую возрастную группу, то меняем его стратегию (см. таблицу 2).
6. Если агент определенное количество времени N (лет) находится в одной отрасли, то осуществляем переход в следующую отрасль согласно текущей стратегии агента (см. таблицу 2), где N – шаг перехода.
7. Увеличиваем возраст агента на один год.
8. Переходим к следующему агенту; если рассмотрели не всех агентов, то возвращаемся к пункту 4.
9. Записываем данные о каждом агенте в отдельный массив.
10. На этом заканчивается один шаг моделирования, переходим к следующему шагу, и если не достигли значения T , то возвращаемся к пункту 3.
11. Вывод статистических данных.

Для реализации этого алгоритма на ЭВМ написана соответствующая программа на языке Delphi 7.0. Она позволяет строить прогнозные сценарии динамики численности занятых в нескольких отраслях экономики и выводить статистические данные по всем отраслям для каждой возрастной группы. Отметим, что данная модель полностью детерминирована и результат

Таблица 3. Массив с агентами для каждой отрасли

№ агента	1	2	...	48	49	50	...	96	97	98	...	144
Возраст	16	17	...	63	16	17	...	63	16	17	...	63
Отрасль	1	1	1	1	2	2	2	2	3	3	3	3

каждого вычислительного эксперимента однозначен. Стохастические переменные опущены, поскольку в данном исследовании не ставилась задача построения детализированной модели, скорее наоборот — осуществлена попытка наименьшим набором переменных и, насколько это возможно, простым алгоритмом описать сложные колебательные режимы динамики численности занятых, наблюдаемые в соответствующих статистических данных.

Рассмотрим результаты вычислительных экспериментов, полученных на основе предложенной модели. Для того чтобы исключить влияние на динамику численности начального распределения агентов, в качестве исходных данных рассмотрено равномерное распределение разновозрастных занятых по каждой отрасли (таблица 3). В модели использовался равномерный шаг перехода в следующую отрасль, равный $N = 2$ года. В модели принято, что каждые два года агенты переходят в следующую отрасль согласно текущей стратегии поведения. Вычислительные эксперименты показали качественную идентичность результатов при разной длине шагов перехода.

В модели принято, что агенты старше 63 лет выводятся из системы и замещаются на работников других возрастных групп. При замещении агентов старше 63 лет на 16-летних через некоторый временной интервал получаем стационарные значения численности занятых трех условных отраслей (рис. 6). При этом отрасли 2 и 3 оказываются конкурирующими, и отрасль 2 «перетягивает» на себя часть работников. Это объясняется тем, что согласно соответствующей стратегии поведения занятые 63 лет концентрируются в 3 отрасли и замещаются на 16-летних занятых, которые все трудоустраиваются на место выбывших в 3-ю отрасль (в начальном распределении они трудоустраиваются во все три отрасли). Затем все 18-летние, согласно их стратегии поведения, сразу оказываются в отрасли 2, не задерживаясь в отрасли 3 (см. таблицу 2).

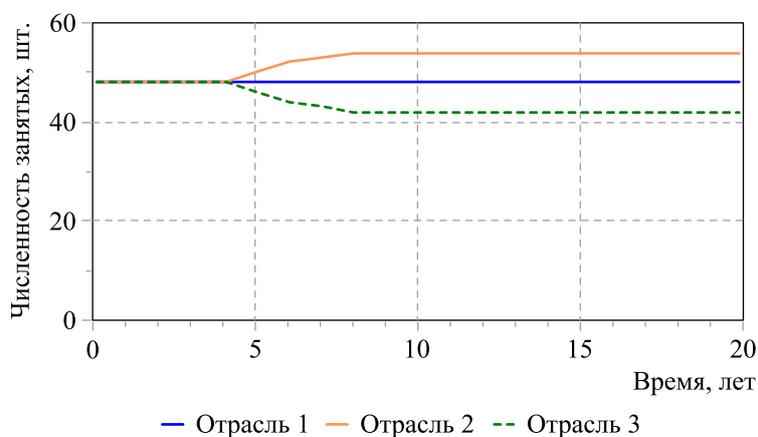


Рис. 6. Динамика численности занятых в трех условных отраслях экономики при замещении 63-летних агентов на 16-летних

Далее проведена серия численных экспериментов, направленная на изучение динамики численности занятых в трех условных отраслях при условии замещения 63-летних работников на занятых различных возрастных групп. Такая ситуация может сложиться, например, вследствие соответствующего миграционного «вымывания» кадров. В итоге получили, что при замещении 63-летних агентов 20-летними из рассматриваемой социально-экономической системы постепенно «выводится» когорта 16–19 лет, и в численности занятых трех условных отраслей наблюдаются периодические колебания (рис. 7, а). Похожие колебания наблюдаются при замещении агентов 63 лет занятыми различных возрастных групп (рис. 7, б, в). При этом замещение 40-летними агентами приводит к возникновению в системе неожиданного эффекта, когда численность работников трех условных отраслей достигает одинаковых, стационарных значений.

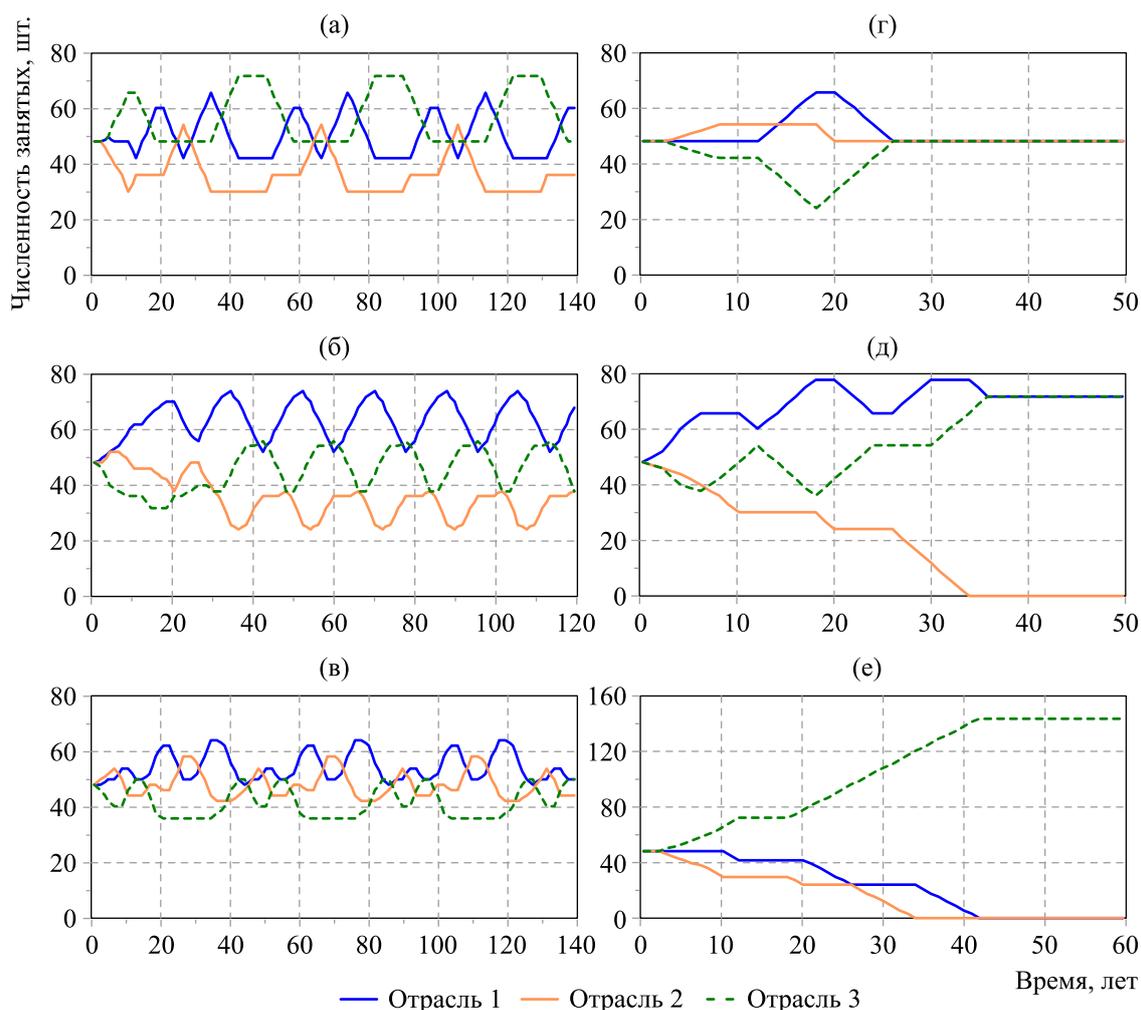


Рис. 7. Динамика численности занятых в трех условных отраслях экономики, при замещении 63-летних агентов на занятых различных возрастных групп: а) 24-летних во всех трех отраслях; б) 36-, 34-, 46-летних в первой, второй и третьей отраслях соответственно; в) 16-, 24-, 22-летних в первой, второй и третьей отраслях соответственно; г, д, е) 40-, 52- и 56-летних во всех трех отраслях

Замещение занятыми старше 40 лет также приводит к периодическим колебаниям. В процессе замещения 63-летних работников на 48-летних и старше также наблюдается достижение стационарного значения, но с обнулением численности одной или двух условных отраслей (рис. 7, д, е).

Таким образом, при равномерном распределении численности разновозрастных занятых численность работников в условных отраслях достигает стационарных значений. При замещении 63-летних работников на занятых старше 16 лет наблюдаются как периодические, так и стационарные режимы динамики с возможным обнулением численности работников одной или двух условных отраслей. Такие режимы динамики численности занятых связаны с нарушением «баланса» стратегий в системе. Выведение отдельных возрастных групп из системы производит «провалы» численности занятых. Если это выведение групп из системы носит долгосрочный характер, то провалы приобретают характер периодических колебаний (рис. 8, 9).

Отметим, что в описанных выше численных экспериментах наблюдаются колебания с периодом 10 и более лет. Можно полагать, что такая динамика характерна для рассматриваемых временных рядов, но их имеющаяся длина не позволяет подтвердить это предположение (это связано с переходом российской статистики с 2004 г. на Общероссийский классификатор видов

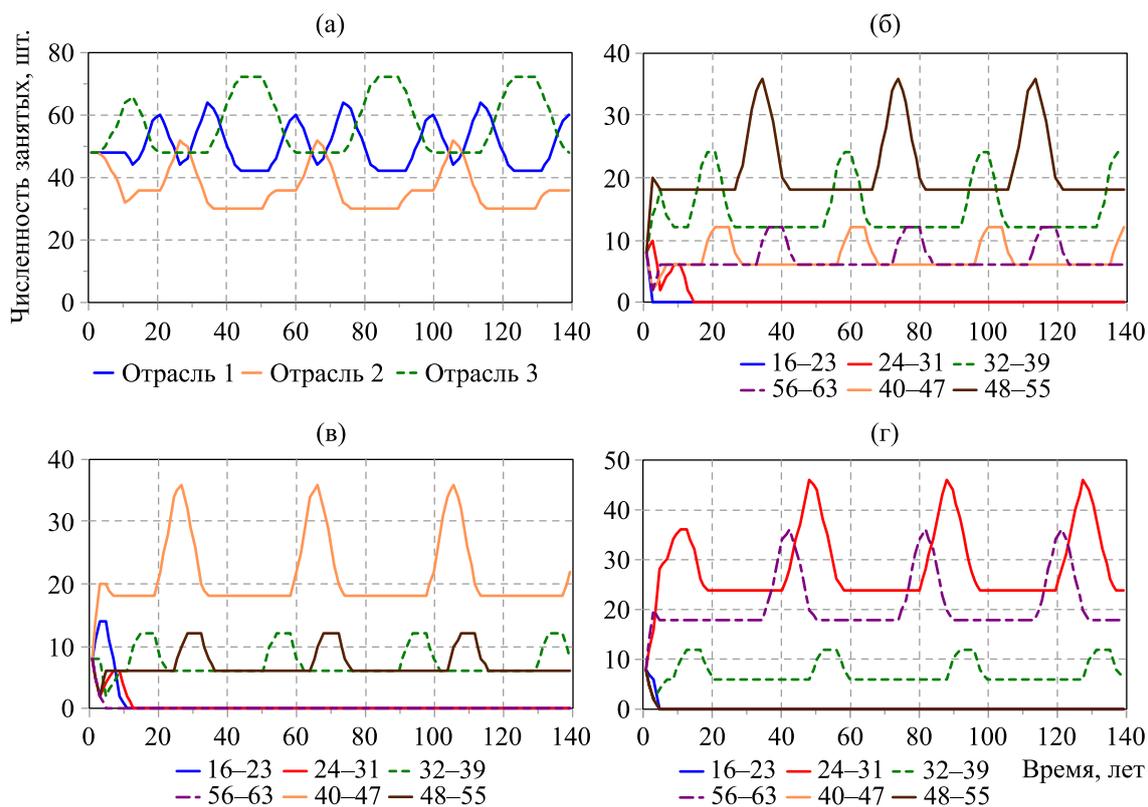


Рис. 8. Динамика численности занятых в трех условных отраслях экономики при замещении 63-летних агентов на 24-, 16-, 24-летних занятых в первой, второй и третьей отраслях соответственно: а) общая численность в каждой из трех отраслей; б, в, г) численность разных возрастных групп в первой, второй и третьей отрасли. Цветная версия рисунка доступна на сайте журнала

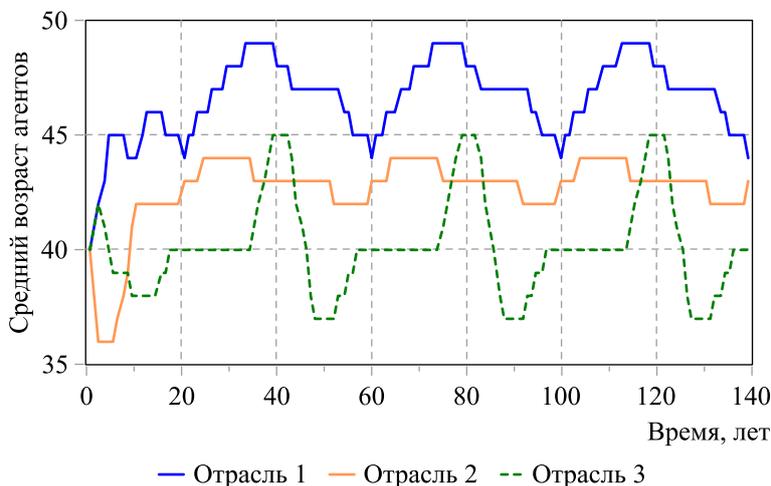


Рис. 9. Динамика среднего возраста агентов по отраслям в модели

экономической деятельности). Тем не менее в статистических данных явно наблюдаются короткопериодные колебания, в частности 2-3-летние (рис. 2, 3). Найдем для модели условия, при которых будут получены такие колебания.

В описанном выше алгоритме мы приняли, что характеристики отраслей с течением времени остаются неизменными (таблица 1). Изменим алгоритм таким образом, чтобы отрасли

дискретно меняли ранг характеристик. Выберем наиболее простое правило изменения характеристик: с каждым шагом столбец характеристик «сдвигается» вправо (таблица 4).

В результате учета нескольких факторов (стратегии выбора отрасли, замещения занятых и изменения характеристик отраслей) в модели появляется нерегулярная динамика, качественно соответствующая характеру временных рядов (рис. 1–4). На рисунке 10 и 11 показаны короткопериодные колебания численности занятых по отраслям в модели при изменении характеристик отраслей с шагом 1 и 5 лет. Из графиков видно, что при увеличении шага изменения характеристик отраслей увеличивается период колебаний. Схожие колебания наблюдаются при рассмотрении численности агентов по возрастным группам (рис. 12).

Обнаруженные колебания также прослеживаются как в рассмотренных статистических данных для Еврейской автономной области (рис. 2–4), так и в модельных данных среднего возраста агентов по отраслям (рис. 13). Как видно из численных экспериментов, полученные

Таблица 4. Алгоритм изменения характеристик условных отраслей в модели

Критерии	Шаг 1			Шаг 2			Шаг 3		
	1 отрасль	2	3	1	2	3	1	2	3
зарплата	A	B	C	C	A	B	B	C	A
престиж	B	C	A	A	B	C	C	A	B
условия труда	C	A	B	B	C	A	A	B	C

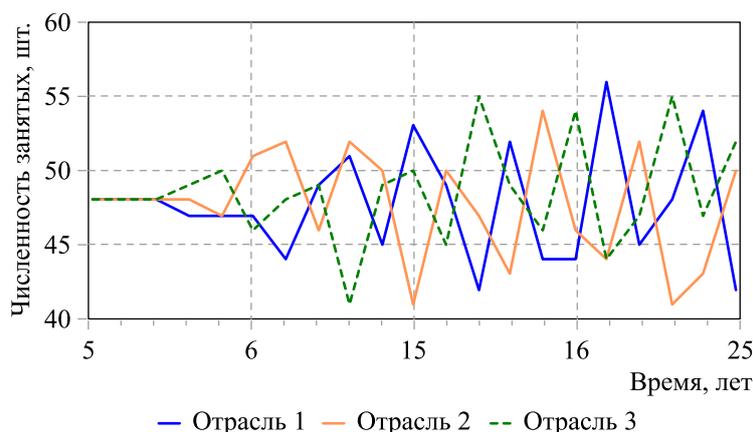


Рис. 10. Короткопериодные колебания численности занятых по отраслям в модели с шагом изменения характеристик отраслей 1 год

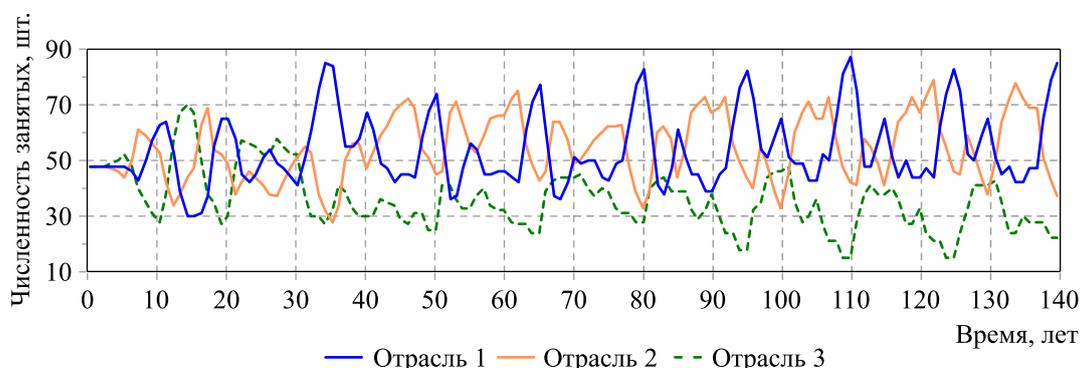


Рис. 11. Короткопериодные колебания численности занятых по отраслям в модели с шагом изменения характеристик отраслей 5 лет

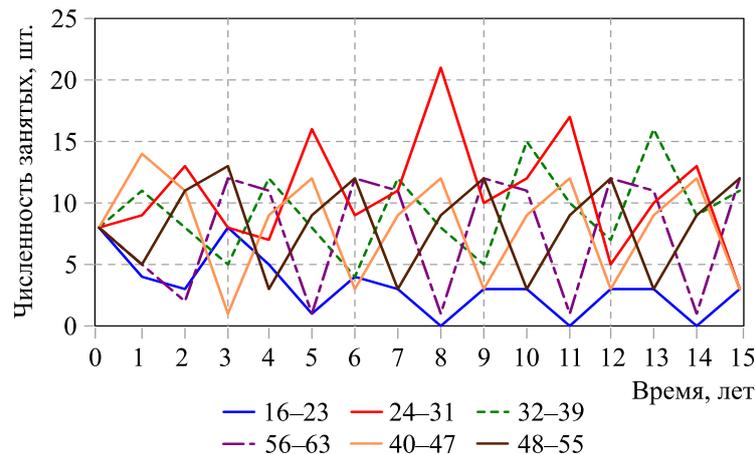


Рис. 12. Короткопериодные колебания численности занятых по возрастным группам в модели с шагом изменения характеристик отраслей 1 год. Цветная версия рисунка доступна на сайте журнала

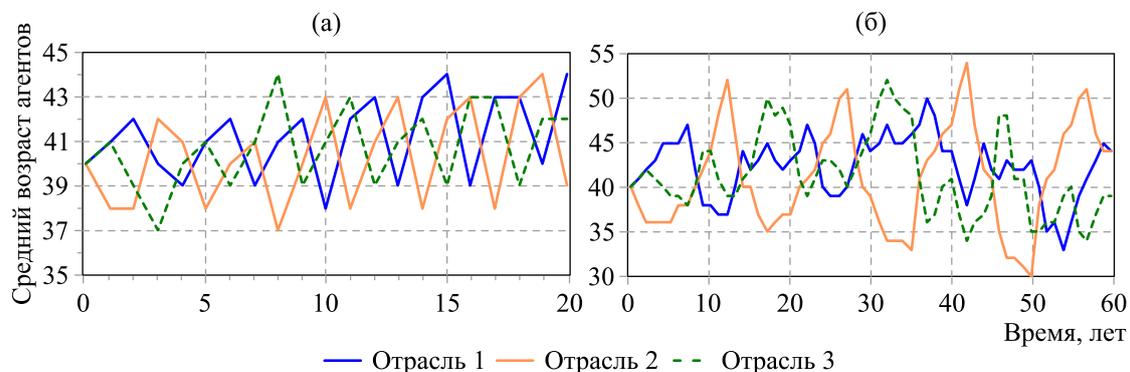


Рис. 13. Динамика среднего возраста агентов по отраслям в модели: а, б) шаг изменения характеристик отраслей 1 и 5 лет соответственно

режимы динамики в модели качественно соответствуют колебаниям численности разновозрастных групп занятых, продемонстрированных на примере Еврейской автономной области.

Следует еще раз подчеркнуть, что в описанной модели число агентов неизменно, т. е. не учитываются особенности демографической динамики. В реальной системе могут происходить колебания численности трудовых ресурсов, которые определяются демографическими процессами. При этом, как показано в работе [Хавинсон, 2017], период демографических колебаний значительно больше периода колебаний численности занятого населения. Это означает, что в данной модели для конкретного региона или страны могут наблюдаться колебания численности занятых с разным периодом, образуемые в результате суперпозиции демографических волн и экономических циклов. Для конкретного региона в модели должна быть учтена динамика трудовых ресурсов, что можно сделать методом возрастных передвижек, а также с помощью регрессионного анализа. Это позволит оценить структурные изменения численности занятых вследствие естественного и механического движения населения, т. е. фактически корректно наполнить модель соответствующими агентами и оценить параметры изменения совокупности агентов. Предпочтения работников, формирующие стратегии поведения, могут быть выявлены социологическими опросами, что позволит выделить страты агентов со стратегиями поведения в модели. Также важно принять во внимание имеющееся соотношение спроса и предложения труда в данном регионе. Если на рынке труда наблюдается дефицит трудовых ресурсов или баланс спроса и предложения, то, скорее всего, отрасли будут выступать в качестве «емкостей», наполняемых агентами

в соответствии с их стратегиями. Если же в регионе сформировался переизбыток предложения труда, то необходимо и сами отрасли (т. е. совокупности предприятий или отдельные предприятия отрасли) рассматривать как агентов, имеющих стратегии выбора работников. В этом случае в модель должны быть включены дополнительные соответствующие характеристики агентов-занятых, например уровень образования.

Также отметим, что в проведенных численных экспериментах был обнаружен интересный эффект: при вытеснении занятых одной возрастной группы во всех условных отраслях динамика численности агентов описывается ломаной линией (рис. 7, а), при этом вытеснение занятых разных возрастных групп в каждой отрасли, соответственно, приводит к сглаживанию данной модельной кривой (рис. 7, б, в). Этот эффект дает основание полагать, что более детальный учет демографических и социально-экономических процессов в модели для конкретного региона даст возможность описать широкий спектр динамических режимов.

4. Заключение

Таким образом, исходя из анализа статистических данных, обнаружены колебания численности занятых как в целом по отраслям экономики, так и отдельно в различных возрастных группах внутри отраслей. Современные экономические и демографические исследования показывают, что стратегии поведения отдельных групп населения могут существенно влиять на социально-экономические процессы [Макаров и др., 2016; Маковеев, 2016; Gilbert, 2008]. Ввиду этого в исследовании было выдвинуто предположение, что наблюдаемые колебания, помимо внешних факторов, могут быть следствием перехода работников между отраслями экономики исходя из определенных стратегий поведения. Чтобы проверить эту гипотезу, была построена соответствующая агент-ориентированная модель, где в качестве динамического процесса рассматривается совокупность различных стратегий поведения экономических агентов, которые изменяются в зависимости от их возраста. При этом все внешние факторы (политические, экономические, социальные, демографические и др.) в модели не меняются во времени.

Результаты моделирования позволяют утверждать, что наличие различных стратегий выбора отрасли в совокупности с возрастными предпочтениями работодателей внутри отрасли действительно может вызывать перераспределение численности разновозрастных занятых, приводящее к периодическим и сложным режимам динамики. При этом отсутствие в модели экзогенных факторов в виде экономических циклов (и в этом смысле ее «рафинированность») ясно демонстрирует эндогенный характер колебаний. Упрощенный учет в модели внешних факторов (в виде изменения характеристик отраслей) и стратегий поведения агентов приводит к уменьшению периода колебаний и к нерегулярной динамике.

Одним из примеров, когда стратегии поведения населения существенно влияют на социально-экономическое развитие, являются результаты реализации некоторых программ, связанных с развитием Дальнего Востока. В частности, программа по переселению соотечественников никак не повлияла на сокращение численности населения Дальнего Востока [Мищук, Калинина, 2017].

Дальнейшее развитие настоящего исследования может заключаться в выявлении социально-экономических показателей, позволяющих оценить целевые функции занятого населения, и перейти к моделированию численности занятых в отраслях экономики конкретного региона.

Также отметим, что в результате исследования показано, что заложенные в модели алгоритмы поведения агентов генерируют колебания, качественно схожие с эмпирически наблюдаемой динамикой численности занятых. Безусловно, этого недостаточно для исчерпывающего объяснения наблюдаемых колебаний. Для того чтобы определить вклад различных факторов в формирование реальной динамики занятости по видам экономической деятельности, необходимо

соответствующее моделирование для конкретных регионов, основанное как на статистических данных, так и на результатах социологических опросов. При этом мы считаем полезным привести результаты этого исследования, поскольку они расширяют представление о взаимодействиях агентов на рынке труда и дают обоснованные предположения о механизмах формирования сложных режимов динамики. Кроме того, предложенный в модели подход к формализации стратегий поведения агентов на рынке труда может быть положен в основу моделирования любых похожих по структуре систем, в которых есть страты агентов с различными стратегиями выбора и соответствующие аккумулирующие «емкости» (студенты и вузы, мигранты и территории, вкладчики и банки и т. д.).

Список литературы (References)

- Андреев В. В., Лукиянова В. Ю., Кадышев Е. Н.* Анализ территориального распределения населения в субъектах Приволжского федерального округа с применением законов Ципфа и Гибрата // Прикладная эконометрика. — 2017. — № 4 (48). — С. 97–121.
Andreev V. V., Lukiyanova V. Yu., Kadyshchev E. N. Analiz territorial'nogo raspredeleniya naseleniya v sub'ektakh Privolzhskogo federal'nogo okruga s primeneniem zakonov Tsipfa i Gibrata [Analysis of people territorial distribution in regions of the volga federal district on the base of Zipf and Gibrat laws] // Applied Econometrics. — 2017. — No. 4 (48). — P. 97–121 (in Russian).
- Антоненко В. В.* Инвестиции в образование и их влияние на уровень дохода населения в регионе // Вестник Волгоградского государственного университета. Сер. 3. Экономика. Экология. — 2013. — № 1. — С. 100–107.
Antonenko V. V. Investment in education and its influence on the income level of population in Russian regions [Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo universiteta. Ser. 3. Ekonomika. Ekologiya] // Science Journal of VolSU. Global Economic System. — 2013. — No. 1. — P. 100–107 (in Russian).
- Васильева А. В.* Трудовой потенциал населения старших возрастных групп в контексте социально-экономического развития регионов (на примере Республики Карелия) // Экономика труда. — 2017. — Т. 4, № 4. — С. 389–400.
Vasil'eva A. V. Trudovoi potentsial naseleniya starshikh vozrastnykh grupp v kontekste sotsial'no-ekonomicheskogo razvitiya regionov (na primere Respubliki Kareliya) [Labor potential of older age groups of the population in the context of socio-economic development of regions (by the example of the Republic of Karelia)] // Russian Journal of Labor Economics. — 2017. — Vol. 4, No. 4. — P. 389–400 (in Russian).
- Калинина И. В., Комарова Т. М.* Формирование расселения и социально-демографическая безопасность в Еврейской автономной области // Известия Российской академии наук. Сер. географическая. — 2013. — № 6. — С. 48–58.
Kalinina I. V., Komarova T. M. Formirovanie rasseleniya i sotsial'no-demograficheskaya bezopasnost' v Evreiskoi avtonomnoi oblasti [Formation of settlement pattern and socio-demographical security in the Jewish autonomous oblast] // Izvestiya Rossiiskoi akademii nauk. Ser. geograficheskaya. — 2013. — No. 6. — P. 48–58 (in Russian).
- Капица С. П., Курдюмов С. П., Малинецкий Г. Г.* Синергетика и прогнозы будущего. — М.: Едиториал УРСС, 2003.
Kapitsa S. P., Kurdyumov S. P., Malinetskii G. G. Sinergetika i prognozy budushchego [Synergetics and forecasts of the future]. — Moscow: Editorial URSS, 2003 (in Russian).
- Колобов А. Н.* Моделирование пространственно-временной динамики древесных сообществ: индивидуально-ориентированный подход // Лесоведение. — 2014. — № 5. — С. 72–82.
Kolobov A. N. Modelirovanie prostranstvenno-vremennoi dinamiki drevesnykh soobshchestv: individual'no-orientirovanniy podkhod [Modeling of spatiotemporal dynamics of the wooden communities: individually aligned approach] // Russian Journal of Forest Science. — 2014. — No. 5. — P. 72–82.
- Комаровская Н. В.* Эволюция “Homo Economicus” // Вестник МГИМО Университета. — 2016. — № 1 (46). — С. 129–142.
Komarovskaya N. V. Evolyutsiya “Homo Economicus” [The Evolution of Homo Economicus] // Vestnik MGIMO-University. — 2016. — No. 1 (46). — P. 129–142 (in Russian).
- Логинов Е. Л., Шкута А. А., Логинова В. Е., Сорокин Д. Д.* Цикло-когерентные подходы к управлению бифуркационными состояниями агрегированных экономических систем в мировой экономике в условиях нелинейной циклической динамики // МИР (Модернизация. Инновации. Развитие). — 2017. — Т. 8, № 2 (30). — С. 314–321.

- Loginov E. L., Shkuta A. A., Loginova V. E., Sorokin D. D.* Tsiklo-kogerentnye podkhody k upravleniyu bifurkatsionnymi sostoyaniyami agregirovannykh ekonomicheskikh sistem v mirovoi ekonomike v usloviyakh nelineinoi tsiklicheskoj dinamiki [Cyclo-coherent approaches to the management of bifurcation states of aggregated economies in the world economy under conditions of nonlinear cyclic dynamics] // *MIR (Modernization. Innovation. Research)*. — 2017. — Vol. 8, No. 2 (30). — P. 314–321 (in Russian).
- Макаров В. Л., Бахтизин А. Р., Сушко Е. Д., Васенин В. А., Борисов В. А.* Агент-ориентированные модели: мировой опыт и технические возможности реализации на суперкомпьютерах // *Вестник Российской академии наук*. — 2016. — Т. 86, № 3. — С. 252–262.
- Makarov V. L., Bakhtizin A. R., Sushko E. D., Vasenin V. A., Borisov V. A., Roganov V. A.* Supercomputer technologies in social sciences: agent-oriented demographic models // *Herald of the Russian Academy of Sciences*. — 2016. — Vol. 86, No. 3. — P. 248–257. (Original Russian paper: Makarov V. L., Bakhtizin A. R., Sushko E. D., Vasenin V. A., Borisov V. A., Roganov V. A. Agent-orientirovannye modeli: mirovoi opyt i tekhnicheskie vozmozhnosti realizatsii na superkomp'yuterakh // *Vestnik Rossiiskoi akademii nauk*. — 2016. — Vol. 86, No. 3. — P. 252–262.)
- Маковеев В. Н.* Применение агент-ориентированных моделей в анализе и прогнозировании социально-экономического развития территорий // *Экономические и социальные перемены: факты, тенденции, прогноз*. — 2016. — № 5 (47). — С. 272–289.
- Makoveev V. N.* Primenenie agent-orientirovannykh modelei v analize i prognozirovanii sotsial'no-ekonomicheskogo razvitiya territorii [Using Agent-Based Models in the Analysis and Forecast of Socio-Economic Development of Territories] // *Economic and Social Changes: Facts, Trends, Forecast*. — 2016. — No. 5. — P. 272–289 (in Russian).
- Мищук С. Н., Калинина И. В.* Современная социально-экономическая ситуация в Еврейской автономной области в период реализации инвестиционных проектов // *Региональные проблемы*. — 2017. — Т. 20, № 4. — С. 95–102.
- Mishchuk S. N., Kalinina I. V.* Sovremennaya sotsial'no-ekonomicheskaya situatsiya v Evreiskoi avtonomnoi oblasti v period realizatsii investitsionnykh projektov [Modern social-economic situation in Jewish Autonomous Region in the period of implementation of investment projects] // *Regional problems*. — 2017. — Vol. 20, No. 4. — P. 95–102 (in Russian).
- Мищук С. Н., Тайорова М. А., Беспалова Н. В.* Переселение соотечественников в Дальневосточный федеральный округ: проблемы и их решения // *Власть и управление на Востоке России*. — 2014. — № 2 (67). — С. 54–61.
- Mishchuk S. N., Taiorova M. A., Bepalova N. V.* Pereselenie sootchestvennikov v Dal'nevostochnyi federal'nyi okrug: problemy i ikh resheniya [Migration of Compatriots to the Far Eastern Federal District: Problems and Their Resolutions] // *The Power and Administration in the East of Russia*. — 2014. — No. 2 (67). — P. 54–61 (in Russian).
- Потанина Ю. А.* Учет региональной возрастной структуры в социально-экономической политике регионов РФ (на примере показателей демографического старения занятого населения) // *Управление экономическими системами: электронный научный журнал*. — 2016. — № 12 (94). — С. 39.
- Potanina Yu. A.* Uchet regional'noi vozrastnoi struktury v sotsial'no-ekonomicheskoi politike regionov RF (na primere pokazatelei demograficheskogo stareniya zanyatogo naseleniya) [Accounting for Age Structure in Regional Socio-Economic Policy in the Russian Federation (on the Example of Indicators of Aging of Employed Population Age Structure)] // *Management of Economic Systems. Scientific Electronic Journal*. — 2016. — No. 12 (94). — P. 39 (in Russian).
- Ризниченко Г. Ю., Рубин А. Б.* Биофизическая динамика производственных процессов. — М.–Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2004. — 464 с.
- Riznichenko G. Yu., Rubin A. B.* Biofizicheskaya dinamika produktsionnykh protsessov [Biophysical dynamics of production processes]. — Moscow-Izhevsk: Institute of Computer Sciences, 2004. — 464 p. (in Russian).
- Соловченко С. А.* Адаптивные механизмы, задействованные в начальный период экономических преобразований на селе // *Аграрная наука*. — 2014. — № 1. — С. 8–9.
- Solovchenkov S. A.* Adaptivnye mekhanizmy, zadeistvovannye v nachal'nyi period ekonomicheskikh preobrazovaniy na sele [Adaptive mechanisms busy in beginning of economic transformation] // *Agrarian science*. — 2014. — No. 1. — P. 8–9 (in Russian).
- Труд и занятость в Еврейской автономной области. Стат. сб. — Еврстат, 2017.*
- Trud i zanyatost' v Evreiskoi avtonomnoi oblasti. Stat. sb.* [Work and employment in the Jewish Autonomous Region. Statistical review]. — Evrstat, 2017 (in Russian).
- Фрисман Е. Я., Неверова Г. П., Ревуцкая О. Л., Кулаков М. П.* Режимы динамики модели двух-возрастной популяции // *Известия высших учебных заведений. Прикладная нелинейная динамика*. — 2010. — Т. 18, № 2. — С. 111–130.

- Frisman E. Ya., Neverova G. P., Revutskaya O. L., Kulakov M. P.* Rezhimy dinamiki modeli dvukhvozrastnoi populyatsii [Dynamic modes of two-age population model] // *Izvestiya VUZ. Applied Nonlinear Dynamics*. — 2010. — Vol. 18, No. 2. — P. 111–130 (in Russian).
- Хавинсон М. Ю., Кулаков М. П., Фрисман Е. Я.* Математическое моделирование динамики численности возрастных групп занятых на примере южных регионов Дальнего Востока России // *Компьютерные исследования и моделирование*. — 2016. — Т. 8, № 5. — С. 787–801.
- Khavinson M. Yu., Kulakov M. P., Frisman E. Ya.* Matematicheskoe modelirovanie dinamiki chislennosti vozrastnykh grupp zanyatykh na primere yuzhnykh regionov Dal'nego Vostoka Rossii [Mathematical modeling of the age groups of employed peoples by the example of the southern regions of the Russian Far East] // *Computer Research and Modeling*. — 2016. — Vol. 8, No 5. — P. 787–801 (in Russian).
- Хавинсон М. Ю.* Моделирование нелинейной динамики уровня занятости в регионе (на примере регионов юга Дальнего Востока России) // *Вестник Пермского университета. Сер. Экономика*. — 2017. — Т. 12, № 4. — С. 575–591.
- Khavinson M. Yu.* Modeling of nonlinear dynamics of employment rate in a region (in the case study of the regions of the south of the Russian Far East) // *Perm University Herald. ECONOMY*. — 2017. — Vol. 12, No 4. — P. 575–591 (in Russian).
- Хавинсон М. Ю., Кулаков М. П.* Модельный анализ динамики численности занятых в разрезе возрастных групп (на примере Хабаровского и Приморского краев) // *Региональные проблемы*. — 2015. — Т. 18, № 4. — С. 13–19.
- Khavinson M. Yu., Kulakov M. P.* Model'nyi analiz dinamiki chislennosti zanyatykh v razreze vozrastnykh grupp (na primere Khabarovskogo i Primorskogo kraev) [Model analysis of the employees' number dynamics by age groups in Khabarovsk and Primorsky Territories] // *Regional problems*. — 2015. — Vol. 18, No. 4. — P. 13–19 (in Russian).
- Шлюфман К. В., Фрисман Е. Я., Неверова Г. П.* Динамические режимы модели рикера с периодически изменяющимся мальтузианским параметром // *Нелинейная динамика*. — 2017. — Т. 13, № 3. — С. 363–380.
- Shlyufman K. V., Frisman E. Ya., Neverova G. P.* Dinamicheskie rezhimy modeli rikera s periodicheski izmenyuuschimsya mal'tuzianskim parametrom [Dynamic modes of the Ricker model with periodic Malthusian parameter] // *Russian Journal of Nonlinear Dynamics*. — 2017. — Vol. 13, No. 3 — P. 363–380 (in Russian).
- Эконофизика. Современная физика в поисках экономической теории / под ред. В. В. Харитонов, А. Л. Ежова.* — М.: МИФИ, 2007.
- Ekonofizika. Sovremennaya fizika v poiskakh ekonomicheskoi teorii* [Econophysics. Modern physics in search of economic theory] / ed. V. V. Kharitonova, A. L. Ezhova. — Moscow: MEPhI, 2007 (in Russian).
- Чердниченко Г. А.* Новые структуры занятости и ориентации молодежи // *Россия реформирующаяся*. — 2015. — № 13. — С. 438–463.
- Cherdnichenko G. A.* Novye struktury zanyatosti i orientatsii molodezhi [New structures of employment and orientation of youth] // *Rossiya reformiruyushchayasya*. — 2015. — No. 13. — P. 438–463 (in Russian).
- Чернавский Д. С., Старков Н. И., Малков С. Ю., Косе Ю. В., Щербаков А. В.* Об эконофизике и ее месте в современной теоретической экономике // *Успехи физических наук*. — 2011. — Т. 81, № 7. — С. 767–773.
- Chernavskii D. S., Starkov N. I., Malkov S. Yu., Kose Yu. V., Shcherbakov A. V.* Ob ekonofizike i ee meste v sovremennoi teoreticheskoi ekonomike [On econophysics and its place in the modern theoretical economics] // *Physics-Uspekh*. — 2011. — Vol. 81, No. 7. — P. 767–773.
- Akerlof G. A., Shiller R. J.* *Animal Spirits: How Human Psychology Drives the Economy, and Why It Matters for Global Capitalism*. — Princeton University Press, 2009.
- Albrecht J. W., Gautier I. A., Vroman S. B.* Matching with multiple applications // *Economics Letters*. — 2003. — Vol. 78, No. 1. — P. 67–70.
- Becker G. S.* *The Economic Approach to Human Behavior*. — University of Chicago Press, 1978.
- Dolado J., Jansen M., Jimeno J. F.* On-the-Job Search in a Matching Model with Heterogeneous Jobs and Workers // *The Economic Journal*. — 2009. — Vol. 119, No. 534. — P. 200–228.
- Frisman E. Ya., Neverova G. P., Revutskaya O. L.* Complex dynamics of the population with a simple age structure // *Ecological Modelling*. — 2011. — Vol. 222, No. 12. — P. 1943–1950.
- Gilbert N.* *Agent-based models*. — Sage Publications Inc., 2008.

-
- Haken H.* Synergetics. An Introduction. — Berlin – Heidelberg – New York: Springer-Verlag, 1977.
- Kolobov A. N., Frisman E. Ya.* Individual-based model of spatio-temporal dynamics of mixed forest stands // *Ecological Complexity*. — 2016. — Vol. 27. — P. 29–39.
- Mortensen D. T.* The cyclical behavior of job and worker flows // *Journal of Economic dynamics and control*. — 1994. — Vol. 18, No. 534. — P. 1121–1142.
- Pissarides C. A.* Search unemployment with on-the-job search // *The Review of Economic Studies*. — 1994. — Vol. 61, No. 3. — P. 457–475.
- Prigogine I., Stengers I.* Order out of Chaos: Man's New Dialogue with Nature. — London: Heinemann, 1984.
- Simon H. A.* Models of Man: Social and Rational. — New York: John Wiley and Sons, Inc., 1957.
- Stavrunova O.* Labor market policies in an equilibrium matching model with heterogeneous agents and on-the-job search. — PhD (Doctor of Philosophy) thesis — University of Iowa, 2007.
- Wozniak M. J.* Placement Agencies in an Artificial Labor Market // *Economics: The Open-Access, Open-Assessment E-Journal*. — 2016. — Vol. 10, No. 29. — P. 1–53.