

На правах рукописи



**Вавилова Дайана Дамировна**

**МЕТОДИКА, МОДЕЛИ И АЛГОРИТМЫ  
ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ДЛЯ АНАЛИЗА И ПРОГНОЗА  
ДИНАМИКИ ЧЕЛОВЕЧЕСКОГО КАПИТАЛА**

Специальность 05.13.10  
Управление в социальных и экономических системах

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Ижевск – 2022

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Ижевский государственный технический университет имени М.Т. Калашникова»

**Научный руководитель**      **Кетова Каролина Вячеславовна**, профессор, доктор физико-математических наук, профессор кафедры прикладной математики и информационных технологий

**Официальные оппоненты**   **Первадчук Владимир Павлович**, профессор, доктор технических наук, профессор кафедры прикладной математики Пермского национального исследовательского политехнического университета

**Марухина Ольга Владимировна**, доцент, кандидат технических наук, доцент Отделения информационных технологий Инженерной школы информационных технологий и робототехники Национального исследовательского Томского политехнического университета

**Ведущая организация**      Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Удмуртский государственный университет», г. Ижевск

Защита состоится «29» сентября 2022 г. в 14 час. 00 мин. на заседании диссертационного совета Д 212.268.05 в ФГБОУ ВО «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники» по адресу: 634050, г. Томск, пр. Ленина, 40, ком. 201.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке ТУСУРа по адресу: г. Томск, ул. Красноармейская, 146 и на сайте ТУСУРа по адресу: <https://postgraduate.tusur.ru/urls/bpukm8th>.

Автореферат разослан «\_\_» июля 2022 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета



Костюченко Евгений Юрьевич

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** Залогом устойчивого развития страны является максимальная реализация социально-экономических возможностей ее регионов. Стабильный рост показателей состояния региональной экономической системы закладывается при построении стратегии ее развития, в рамках которой определяются оптимальные соотношения объемов финансирования производственной и социальной сфер деятельности. При построении такой стратегии в её основу должны быть положены математически подтвержденные и экономически обоснованные результаты. Соответственно, необходимо иметь инструментарий для оперативного анализа и точного прогноза показателей социально-экономических процессов в регионах.

Актуальность темы также обусловлена процессами цифровизации. Фундаментальным документом, регламентирующим цифровизацию в Российской Федерации, является утвержденная Президентом В.В. Путиным Стратегия развития информационного общества в РФ на 2017-2030 гг. Особое внимание процессам цифровизации свидетельствует о ключевой роли государства как инициатора и регулятора цифровой трансформации. Применение цифровых технологий позволяет усилить системный подход к реализации и мониторингу национальных проектов, направленных на социально-экономическое развитие территорий, таких как «Цифровая экономика», «Демография» и «Здоровье».

Если производственная сфера деятельности характеризуется величиной и структурой производственного капитала, методология оценки и расчета которого хорошо известна, то для оценки социальной сферы в последнее время все чаще применяется такой показатель, как человеческий капитал (ЧК). В настоящее время ЧК как объект инвестиций должен рассматриваться в не меньшей степени, чем материально-технический фактор, поскольку он становится существенным ресурсом, обеспечивающим повышение эффективности функционирования современной экономики.

Показатели социально-экономических процессов тесно взаимосвязаны. В частности, демографические процессы в обществе влияют на экономические. При этом прогноз социально-экономических показателей является актуальной задачей, важность которой определяется необходимостью выявления тенденций развития данных показателей в будущем с целью упреждения либо сглаживания негативных последствий для развития экономики.

Для повышения точности и предсказуемости прогнозов динамики социально-экономических процессов большое значение приобретает оперативность и адаптивность их построения. В этой связи актуальной задачей является разработка информационно-аналитической системы анализа и прогноза социально-экономических процессов, использующей адаптивные алгоритмы моделирования и прогнозирования, которые обладают способностью дифференцировать информационную ценность различных членов временных рядов. Применение математического инструментария адаптивного прогнозирования позволяет своевременно корректировать программу стратегического развития, а также осуществлять построение более точных сценариев развития экономик регионов.

**Степень разработанности тематики.** Активное исследование показателей, отражающих социально-экономические процессы в обществе, начинается в XVIII-XIX вв.: большой вклад в их моделирование внесли О. Курно, У. Джевонс, Л. Вальрас, А. Маршал, И. Фишер и др. В начале XX в. развиваются теории применения динамических моделей к анализу экономических процессов (Я. Тинберген, Р. Фриш, Т. Купманс и др.). В отечественной науке в это время формируются теоретические подходы к решению задач моделирования социально-экономических показателей (М.И. Туган-Барановский, Н.Д. Кондратьев, А.Н. Ковалевский и др.).

В XX веке исследования социально-экономических показателей привели к утверждению, что основным фактором благосостояния экономики является человек. Начиная с середины XX века получает развитие современная теория человеческого капитала. Оценка ЧК находит отражение в работах американских ученых-экономистов Т. Шульца, Дж. Минсера, С. Кузнецца, Г. Беккера, Дж. Кендрика, Л. Туроу, Д. Йоргенсона. Также значительный вклад в развитие теории человеческого капитала внесли М. Блауг, Р. Лукас, М. Перлмен, Б. Фраумени и др. Среди отечественных исследователей проблем оценки ЧК можно отметить М.М. Критского, С.А. Дятлова, А.В. Корицкого, С.А. Курганского, Р.И. Капелюшникову, М.Ю. Романовского. Общепринятой количественной методики оценки ЧК в настоящее время не существует.

На основе проведенных исследований разработана информационно-аналитическая система (ИАС), предназначенная для совместного решения задач моделирования, прогнозирования и параметрических исследований показателей социально-экономических процессов, включая величину человеческого капитала населения региона. Разработанное программное обеспечение позволяет выполнять комплексное исследование показателей социально-экономических процессов с применением современных технологий математического моделирования, методов машинного обучения и вычислительного эксперимента. Патентный поиск отечественных и зарубежных программных продуктов показал, что разработанная ИАС с точки зрения комплексного подхода к изучению социально-экономических показателей региона, включая человеческий капитал, аналогов не имеет.

**Объектом исследования** в настоящей диссертационной работе является математический и инструментальный аппарат описания динамики человеческого капитала и показателей социально-экономических процессов.

**Предмет исследования:** анализ и прогноз динамики человеческого капитала с использованием методов машинного обучения.

**Цель диссертационной работы:** разработка математического аппарата и программного обеспечения для решения задач анализа и прогноза динамики человеческого капитала.

В ходе работы решались следующие научные и практические задачи:

1. Построение методики и математических моделей оценки и прогноза величины человеческого капитала.

2. Разработка алгоритма прогнозирования количественных и качественных составляющих человеческого капитала.

3. Проектирование и наполнение базы данных показателей социально-экономических процессов в регионе, на основе которых производится цифровая обработка и визуальное представление информации.

4. Создание информационно-аналитической системы анализа и прогноза показателей социально-экономических процессов, включая ЧК населения.

5. Проведение параметрических исследований показателей социально-экономических процессов, определяющих величину человеческого капитала.

**Источниками данных для исследования** послужили статистические данные по демографическим и экономическим разделам официальных сайтов: Федеральной службы государственной статистики РФ, Территориального органа Федеральной службы государственной статистики по Удмуртской Республике (УР), Федеральных статистических наблюдений по социально-демографическим проблемам в РФ, исследований Высшей школы экономики и др.

**Методика работы** основана на использовании общенаучных методов исследования, методов статистической обработки данных, применении алгоритмов математического моделирования и прогнозирования, машинного обучения.

**Достоверность и обоснованность полученных результатов.** Обоснованность результатов обеспечена применением научной методологии и использованием современных методов математического моделирования и прогнозирования, достоверность методов – исследованием их сходимости и оценкой точности. В практических расчетах использованы статистические данные по УР.

**Область исследования диссертационной работы** соответствует указанным в паспорте специальности 05.13.10 «Управление в социальных и экономических системах» (технические науки) пунктам: п. 5 «Разработка специального математического и программного обеспечения систем управления и принятия решений в социальных и экономических системах»; п.7 «Разработка методов идентификации в организационных системах на основе ретроспективной, текущей и экспертной информации»; п.8 «Разработка методов и алгоритмов анализа и синтеза организационных структур».

#### **Научная новизна работы:**

1. Разработана оригинальная математическая модель количественной оценки человеческого капитала, отличающаяся от известных моделей комплексным учетом вклада качественной структуры населения в составляющие человеческого капитала: образование, здоровье и культуру.

2. Впервые реализован вычислительный нейросетевой алгоритм для прогнозирования количественных и качественных составляющих человеческого капитала с учетом влияния факторов внешней среды региональной социально-экономической системы.

3. Создана новая информационно-аналитическая система адаптивного прогнозирования и параметрических исследований показателей социально-экономической системы, включающая, в отличие от существующих, определение величины и динамики человеческого капитала населения.

4. Впервые выполнено комплексное исследование показателей социально-экономических процессов Удмуртской Республики, позволяющее оценить влияние количественных и качественных характеристик различных групп населения на динамику человеческого капитала. Показано, что основной вклад (более 65 %) в величину ЧК вносит образовательная составляющая.

**Теоретическая значимость работы** заключается в развитии математических моделей и алгоритмов оценки количественных и качественных составляющих человеческого капитала. Предложена методика оценки и прогноза величины и динамики ЧК с учетом факторов внешней среды социально-экономической системы региона. Созданный математический и инструментальный аппарат предоставляет возможность решения задач прогнозирования динамики показателей социально-экономических процессов, определяющих величину ЧК.

**Практическая значимость работы** подтверждается результатами внедрения диссертационной работы в деятельность АНО «Цифровая экономика УР» при Правительстве РФ и в научно-образовательный процесс ФГБОУ ВО «Ижевский государственный технический университет имени М.Т. Калашникова». Использование разработанных алгоритмов и программного обеспечения позволило АНО «Цифровая экономика УР» снизить время, затрачиваемое на анализ и построение прогнозов исследуемых показателей социально-экономического развития региона, в 2-3 раза, а также повысить точность прогнозов: средняя относительная ошибка прогнозирования показателей снизилась до 3-5 %. Внедрение результатов диссертационной работы в научно-образовательный процесс ИжГТУ имени М.Т. Калашникова позволило исключить временные затраты обучающихся, связанные с концептуальным и логическим проектированием базы данных, при выполнении курсовых и выпускных квалификационных работ, посвященных решению задач анализа и прогноза социально-экономического развития различных регионов РФ. Кроме того, созданная база данных статистической информации по УР требует только ежегодного дополнения, тем самым сокращает время подготовки исходной информации при решении задач адаптивного прогнозирования социально-экономических показателей.

**Реализация результатов.** Полученные в ходе диссертационного исследования результаты использованы:

– в учебном процессе кафедры «Прикладная математика и информационные технологии» ФГБОУ ВО «Ижевский государственный технический университет имени М.Т. Калашникова» при проведении лабораторных и курсовых работ по дисциплинам: «Математическое моделирование», «Эконометрика», «Методы оптимизации и теория оптимального управления» и «Проектирование программного обеспечения», а также при выполнении выпускных квалификационных работ в процессе подготовки бакалавров направления 01.03.04 Прикладная математика по профилю «Применение математических методов и программных средств для решения инженерных и экономических задач» и магистрантов направления 01.04.04 Прикладная математика по программе «Разработка программного обеспечения и математических методов решения задач с использованием искусственного интеллекта»;

– в научном процессе при выполнении гранта ИжГТУ имени М.Т. Калашникова №01.04.04/18ККВ от 29.12.2018 г. на 2019-2020 гг. по теме: «Анализ демографических процессов и исследование динамики человеческого капитала региона (на примере Удмуртской Республики)»;

– в рабочем процессе АНО «Цифровая экономика УР», финансируемой из средств федерального бюджета в рамках реализации программы «Цифровая экономика РФ» и имеющей своей задачей выполнение проектов, формируемых в министерствах и ведомствах на территории региона. Результаты, полученные на основе ИАС «Моделирование и прогнозирование показателей социально-экономических процессов региона», использованы при выполнении проекта Министерства экономики УР «Разработка прогноза социально-экономического развития Удмуртской Республики на среднесрочный период».

**Основные положения, выносимые на защиту:**

1. Методика и математическая модель количественной оценки человеческого капитала, учитывающая влияние временных и возрастных изменений демографической структуры и распределение капиталовложений в ее качественные составляющие: образование, здоровье и культуру.

2. Вычислительный нейросетевой алгоритм прогнозирования количественных и качественных составляющих ЧК, учитывающий влияние факторов внешней среды социально-экономической системы, что повышает точность прогноза: средняя относительная погрешность на участке ретропрогноза снизилась до 3-5% по сравнению с алгоритмом без показателей внешней среды во входных данных, где погрешность составила 10-14%.

3. ИАС анализа, прогноза и параметрических исследований показателей социально-экономических процессов, включая величину и динамику человеческого капитала, позволяющая лицу, принимающему решения, существенно сократить время их принятия, вследствие снижения времени, затрачиваемого на анализ и построение прогнозов исследуемых показателей, в 2-3 раза.

4. Результаты комплексного исследования показателей социально-экономических процессов УР, позволяющие оценить влияние количественных и качественных характеристик различных групп населения на динамику ЧК.

**Апробация работы.** Основные результаты диссертационной работы докладывались на следующих научных конференциях:

1. Международная конференция «Информатика, математика, автоматика» (Сума, Сумский государственный университет, апрель 2015 г.).

2. VIII Международная конференция «Технические университеты: интеграция с европейскими и мировыми системами образования» (Ижевск, ИжГТУ имени М.Т. Калашникова, апрель 2019 г.).

3. X international scientific conference «Informatization of society: socio-economic, socio-cultural and international aspects» (Прага, Чехия, январь 2020 г.).

4. Международная научно-практическая конференция Евразийского научного объединения «Перспективные направления развития современной науки» (Москва, март 2020 г.).

5. IV Международная научно-техническая конференция «Прикладная математика и информатика: современные исследования в области естественных и технических наук» (Тольятти, Тольяттинский государственный университет, апрель 2020 г.).

6. Международная конференция «Актуальные задачи математического моделирования и информационных технологий (Сочи, сентябрь 2020 г.).

7. II International Conference «ICMSIT-II-2021: International Conference of Innovative Technologies» (Санкт-Петербург, Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, март 2021 г.).

8. Полностью работа докладывалась на научном семинаре д.т.н., профессора Русяка И.Г. на кафедре «Прикладная математика и информационные технологии» Ижевского государственного технического университета имени М.Т. Калашникова (Ижевск, сентябрь 2021 г.).

**Публикации.** По теме диссертационного исследования опубликовано 22 работы, в т.ч. 2 статьи Web of Science, 3 статьи Scopus, 6 статей в изданиях, рекомендованных ВАК, 8 статей, размещенных в РИНЦ, а также получено 3 свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ Роспатента РФ.

**Личный вклад автора.** Математическая постановка задачи оценки и прогнозирования человеческого капитала, а также анализ результатов, полученных в диссертации, осуществлены совместно с научным руководителем. Самостоятельно обработана статистическая информация, разработана информационно-аналитическая система, разработан и реализован алгоритм нейросетевого моделирования и прогнозирования показателей социально-экономических процессов в регионе.

**Структура и объем работы.** Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, библиографического списка и приложений. Объем диссертации – 157 страниц, включая 56 рисунков, 25 таблиц и список литературы из 147 наименований.

В **приложении** представлены акты о внедрении и использовании результатов исследования, свидетельства о регистрации программ ЭВМ, интерфейс и основные модули разработанной информационно-аналитической системы.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

Во **введении** обосновывается актуальность темы, определены цель и задачи работы, сформулированы научная новизна и основные положения, выносимые на защиту.

В **первой главе** изучены методы анализа и прогноза социально-экономических процессов. Точностью обладают только формализованные методы, поскольку они предполагают построение математической модели взаимосвязи изменения состояния объекта исследования от других факторов, тем самым предоставляя качественный прогноз с заданным уровнем надежности.

Математические методы прогнозирования имеют специфику применения для данных различных типов. Модели регрессионного анализа эффективны в случае выявленных факторов, влияющих на результирующую переменную.



Трендовые модели используются при моделировании временных рядов, когда невозможно выделить закономерности в динамике развития процесса от внутренних факторов. Однако регрессионные модели обладают недостатком: при анализе временных рядов не учитывается ценность уровней ряда, т.е. может быть занижена значимость данных последних лет. Это позволяют учесть адаптивные алгоритмы, в том числе нейронные сети.

Рассмотрено понятие человеческого капитала, как показатель развития экономической системы. Из анализа научной литературы следует, что существует множество подходов к определению понятия ЧК и к его оценке, однако в изученных работах не представлена количественная методология оценки, анализа и прогноза ЧК с учетом его качества.

**Вторая глава** посвящена моделированию количественных и качественных составляющих человеческого капитала для его оценки.

Количественная составляющая ЧК – это демографическая составляющая или численное воспроизводство населения. Для моделирования возрастной динамики демографических элементов используется уравнение:

$$\frac{\partial \rho(t, \tau)}{\partial t} + \frac{\partial \rho(t, \tau)}{\partial \tau} = -\mu(t, \tau)\rho(t, \tau) + l(t, \tau)\rho(t, \tau). \quad (1)$$

где  $\rho(t, \tau)$  – плотность распределения населения по возрасту  $\tau$  в год  $t$ ;  $\mu(t, \tau)$  – коэффициент распределения смертности населения по возрасту, задающий долю смертей в группе возраста  $\tau$  в год  $t$ ;  $l(t, \tau)$  – коэффициент миграционного взаимодействия, задающий долю мигрантов в группе возраста  $\tau$  в год  $t$ .

Помимо учета количественной составляющей для оценки ЧК в региональной социально-экономической системе предполагается изучение социальных групп, формируемых демографическими элементами по качественным признакам. В данной главе приведены математические модели динамики структуры населения региона по уровням образования, здоровья и культуры.

В **третьей главе** представлена математическая модель человеческого капитала, учитывающая демографическую структуру населения и временно-возрастное распределение капиталовложений в его составляющие: образование, здоровье и культуру, а также описан нейросетевой алгоритм прогнозирования количественных и качественных составляющих ЧК с учетом влияния факторов внешней среды региональной социально-экономической системы.

Задача моделирования величины ЧК основана на применении подхода стоимостной оценки входящих в его состав капитала образования, капитала здоровья и капитала культуры, учитывающей бюджетные инвестиции государства и частные расходы граждан. Удельное (на одного человека) среднестатистическое значение ЧК определяется линейной комбинацией его составляющих:

$$h(t, \tau) = \bar{\gamma}_1 h_1(t, \tau) + \bar{\gamma}_2 h_2(t, \tau) + \bar{\gamma}_3 h_3(t, \tau), \quad \bar{\gamma}_i \in (0; 1), \quad \sum_{i=1}^n \bar{\gamma}_i = 1, \quad (2)$$

где  $\bar{\gamma}_i$  – весовые коэффициенты для составляющих ЧК; значения  $h_i = h_i(t, \tau)$  измеряются в денежных единицах; индекс  $i = 1$  соответствует образовательной составляющей,  $i = 2$  – составляющей здоровья;  $i = 3$  – составляющей культуры.

Эволюция каждой из составляющих ЧК  $h_i(t, \tau)$  описывается уравнением:

$$\frac{\partial h_i(t, \tau)}{\partial t} + \frac{\partial h_i(t, \tau)}{\partial \tau} = -v_i h_i(t, \tau) + s_i(t, \tau) + p_i(t, \tau), \quad (3)$$

где  $s_i = s_i(t, \tau)$  – удельные расходы государства;  $p_i = p_i(t, \tau)$  – удельные частные инвестиции;  $v_i = v_i(t, \tau)$  – коэффициент выбытия.

Зависимость от возраста для функций  $v_i = v_i(\tau)$ ,  $i = 1, 2$  примем в виде:

$$v_i(\tau) = \begin{cases} 0, & \tau \leq \tau_{ai}, \\ b_i \{ \exp[a_i(\tau - \tau_{ai})] - 1 \}, & \tau_{ai} \leq \tau \leq \tau_m, \end{cases} \quad (4)$$

где неизвестные параметры  $(b_i, a_i)$  определяются из условий:

$$b_i \{ \exp[a_i(\tau_m - \tau_{ai})] - 1 \} = 1, \quad (5)$$

$$\int_0^{\tau_m} [s_i(t, \tau) + p_i(t, \tau)] d\tau = \int_{\tau_{ai}}^{\tau_m} \{ b_i \{ \exp[a_i(\tau - \tau_{ai})] - 1 \} \} h_i(t, \tau) d\tau. \quad (6)$$

Здесь  $\tau_{ai}$  – верхняя граница активного периода физического состояния ( $i = 1$ ) или трудовой деятельности ( $i = 3$ ). Полагается, что в отличие от других составляющих, культурная составляющая не подвержена износу,  $v_3 \equiv 0$ .

Суммарная величина ЧК населения определится из выражения:

$$H(t) = \int \sum_{i=1}^3 \bar{\gamma}_i h_i(t, \tau) a(t, \tau) \rho(t, \tau) d\tau, \quad (7)$$

где  $a(t, \tau)$  – доля населения возраста  $\tau$ , участвующая в производстве в год  $t$ .

В правой части (3) присутствуют удельные расходы бюджета  $s_i = s_i(t, \tau)$  и удельные частные инвестиции  $p_i = p_i(t, \tau)$ . Они определены по формулам:

$$s_i(t, \tau) = \sum_{N_i} \frac{S_{Ni}(t)}{\int_{\tau_{1Ni}}^{\tau_{2Ni}} \rho(t, \tau) d\tau}, \quad S_{Ni}(t) = \begin{cases} S_{Ni}(t, \tau), & \tau \in [\tau_{1Ni}, \tau_{2Ni}], \\ 0, & \tau \notin [\tau_{1Ni}, \tau_{2Ni}]. \end{cases} \quad (8)$$

$$p_i(t, \tau) = \sum_i \frac{P_i(t)}{\int_{\tau_{1i}}^{\tau_{2i}} \rho(t, \tau) d\tau}, \quad P_i(t) = \begin{cases} P_i(t, \tau), & \tau \in [\tau_{1i}, \tau_{2i}], \\ 0, & \tau \notin [\tau_{1i}, \tau_{2i}]. \end{cases} \quad (9)$$

Здесь  $S_{Ni}(t)$  – бюджетные расходы;  $N_i$  – нумерация статей бюджета, расходующихся на образование ( $i = 1$ ), здравоохранение ( $i = 2$ ) и культурную составляющую ЧК ( $i = 3$ ). Суммы будем распределять равномерно на соответствующие периоды жизни человека  $[\tau_{1Ni}, \tau_{2Ni}]$  и на численность людей в этих периодах.

Для решения задачи моделирования и прогнозирования объемов бюджетных и частных инвестиций в ЧК разработан нейросетевой алгоритм. При этом учитываются факторы внешней среды – индикаторы социально-экономического развития регионов. В качестве таких индикаторов выделены показатели направлений функционирования социально-экономической системы: производство товаров и услуг; материальное благосостояние; качество социальной

сферы; социальная безопасность; демография; здоровье; субъективное благосостояние. Включение индикаторов социально-экономического развития региона в нейросетевой алгоритм позволяет учесть их влияние на величину и динамику объемов инвестиций в составляющие ЧК.

Методика моделирования и прогнозирования ЧК социально-экономической системы с использованием нейросетевой модели представлена на рис. 1.

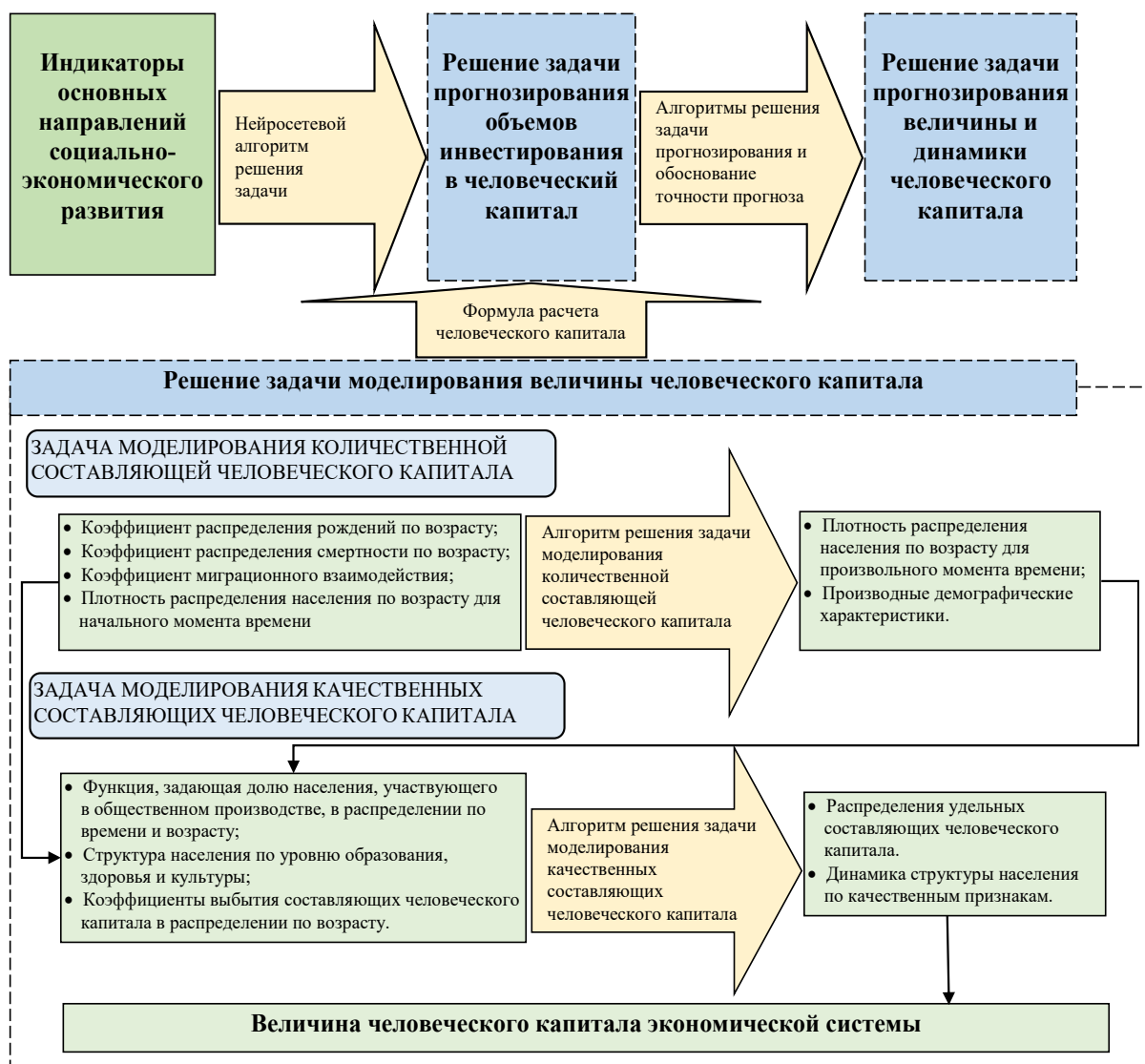


Рис. 1 – Методика моделирования и прогнозирования человеческого капитала

Для решения задачи прогнозирования динамики ЧК используются результаты решения двух подзадач: задачи прогнозирования объемов инвестиций в ЧК и задачи моделирования величины ЧК. Для моделирования ЧК используется модель, построенная на основе уравнения переноса, в которой учитываются бюджетные и частные инвестиции в капитал образования, здоровья и культуры, а также качественная структура населения. Для прогнозирования объемов инвестиций в ЧК использован нейросетевой алгоритм.

На рис. 2 представлена нейросетевая модель, положенная в основу алгоритма прогнозирования. Блок-схема нейросетевого алгоритма представлена на рис. 3. Нейросетевая модель представляет собой многослойный персептрон с

сигмоидальной логистической функцией активации; её структура определяется 2 скрытыми слоями и 10 нейронами в каждом из них. Входными данными в модели являются объемы бюджетных  $\{S_i\}_{i=\overline{1,3}}$  и частных инвестиций  $\{P_i\}_{i=\overline{1,3}}$  в ЧК, индикаторы направлений социально-экономического развития  $\{I_i\}_{i=\overline{1,8}}$ , индекс-дефлятор  $K$  (для учета инфляционных процессов) и показатели оценки качественной структуры населения  $\{\gamma_i^j\}_{i=\overline{1,3}}^{j=\overline{1,5}}$ . Выходные данные нейронной сети – это прогнозные объемы бюджетных  $\{\tilde{S}_i\}_{i=1}^{n=3}$  и частных  $\{\tilde{P}_i\}_{i=1}^{n=3}$  инвестиций в ЧК, индикаторов направлений социально-экономического развития  $\{\tilde{I}_i\}_{i=1}^{n=8}$ , индекс-дефлятора  $\tilde{K}$  и показатели качественной структуры населения  $\{\tilde{\gamma}_i^j\}_{i=\overline{1,3}}^{j=\overline{1,5}}$ .

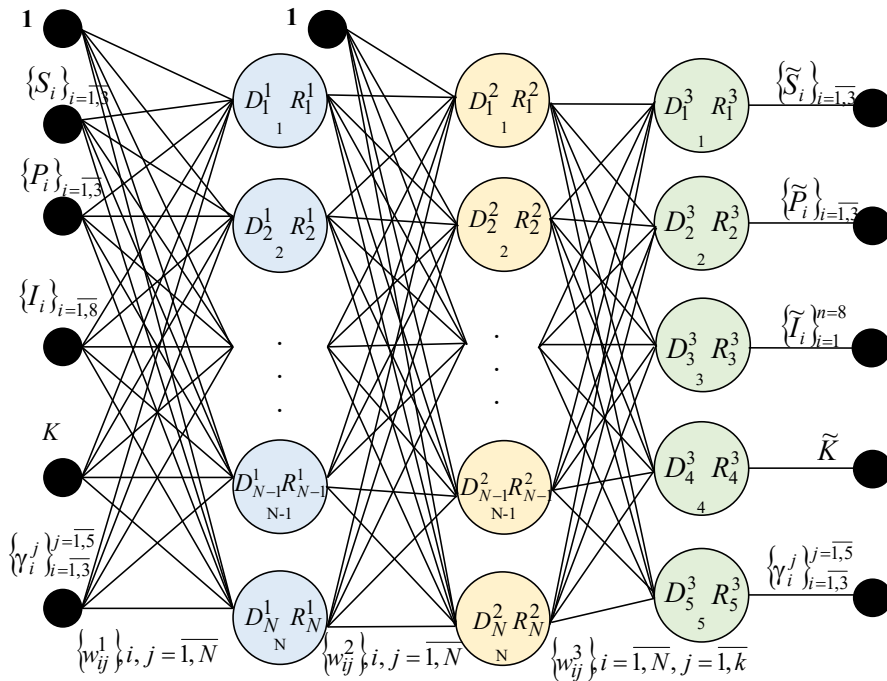


Рис. 2 – Нейросетевая модель ( $D$ – входной сигнал,  $R$ – выходной сигнал)

Для обучения ИНС производится нормировка входных и выходных данных в диапазоне  $[0;1]$  в области их определения. Процесс обучения состоит в подстройке весовых коэффициентов  $w_{ij}^p$ . Для этого подают входные данные  $\mathbf{x}_q = (x_{q1}, x_{q2}, \dots, x_{qm})$  и сравнивают выходные значения сети с заданными значениями  $\mathbf{r}_q = (r_{q1}, r_{q2}, \dots, r_{ql})$ ,  $q = 1, \dots, n$  на следующем шаге периода прогноза. На обучающем множестве реализуется метод обратного распространения ошибок.

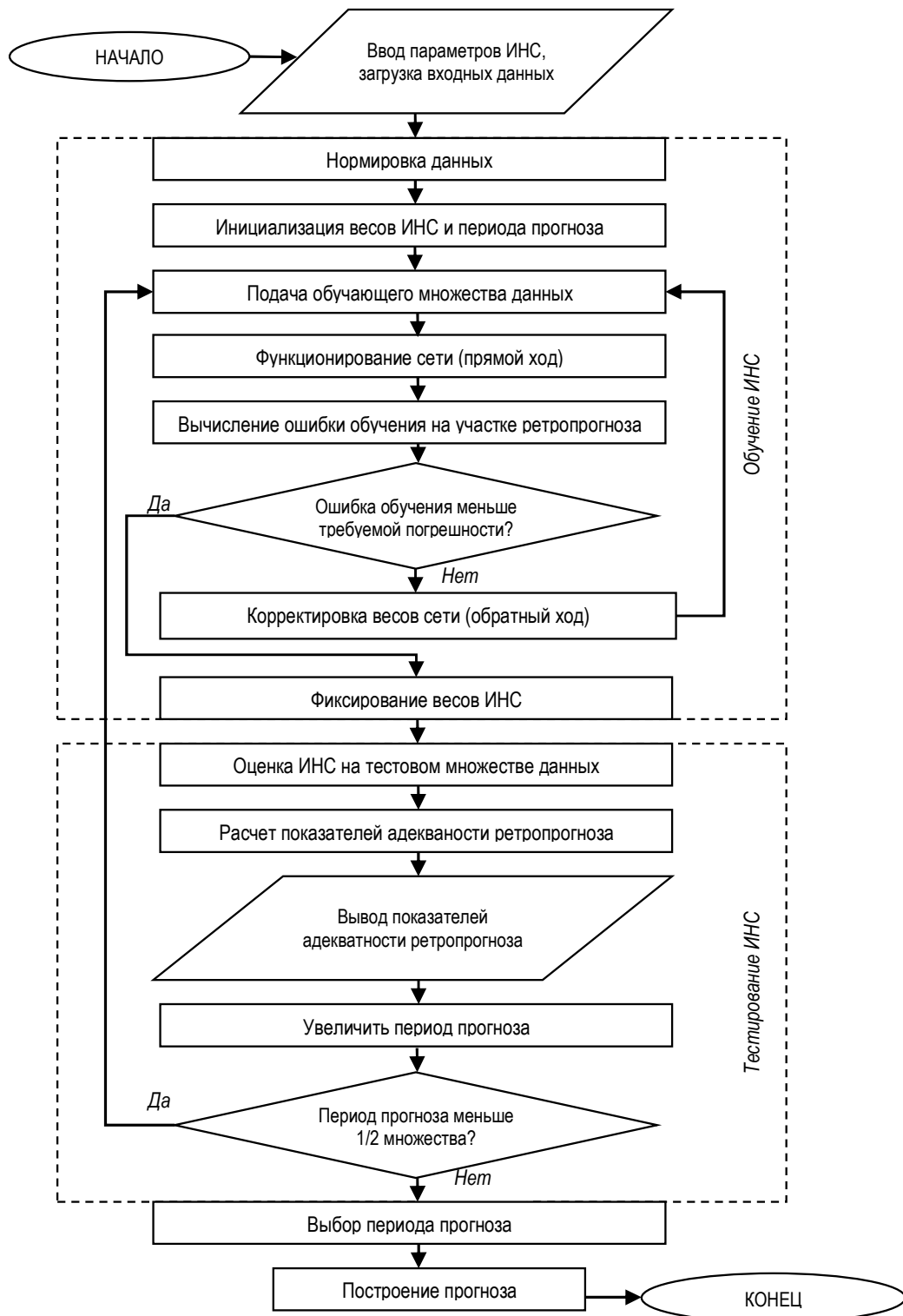


Рис. 3 – Блок-схема нейросетевого алгоритма прогнозирования

Используется погрешность обучения сети, рассчитанная по формуле:

$$E_q(\vec{W}) = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^l (y_{qj} - r_{qj})^2, \quad q = 1, \dots, n, \quad (10)$$

где  $y_{qj}$  – соответствует  $j$ -му выходу при подаче на вход  $q$ -го образа.

Качество обучения сети определяется погрешностью обучения:

$$\tilde{E}(\vec{W}) = 100 \sqrt{\frac{2}{l \cdot n} \sum_{q=1}^n E_q(\vec{W})}. \quad (11)$$

Статистическая информация делится на два множества: обучающее множество, а также тестовое, которое представляет из себя участок ретропрогноза. Погрешность расчетов определяется по формуле:

$$\tilde{\varepsilon} = \frac{1}{N^{test}} \sum_{t \in \Omega^{test}} \frac{|y_t^* - y_t^r|}{y_t^r}, \quad (12)$$

где  $N^{test}$  – количество элементов в  $\Omega^{test}$ ;  $y^*$  – значения, полученные по ИНС;  $y^r$  – заданные статистические данные.

**Четвертая глава** посвящена разработке информационно-аналитической системы «Моделирование и прогнозирование показателей социально-экономических процессов региона». Приведены результаты численных исследований задачи моделирования и прогнозирования показателей социально-экономических процессов на примере статистических данных УР. Проведен параметрический анализ развития человеческого капитала при различных комбинациях входящих факторов. На рис. 4 представлена структура информационно-аналитической системы (ИАС) «Моделирование и прогнозирование показателей социально-экономических процессов региона».

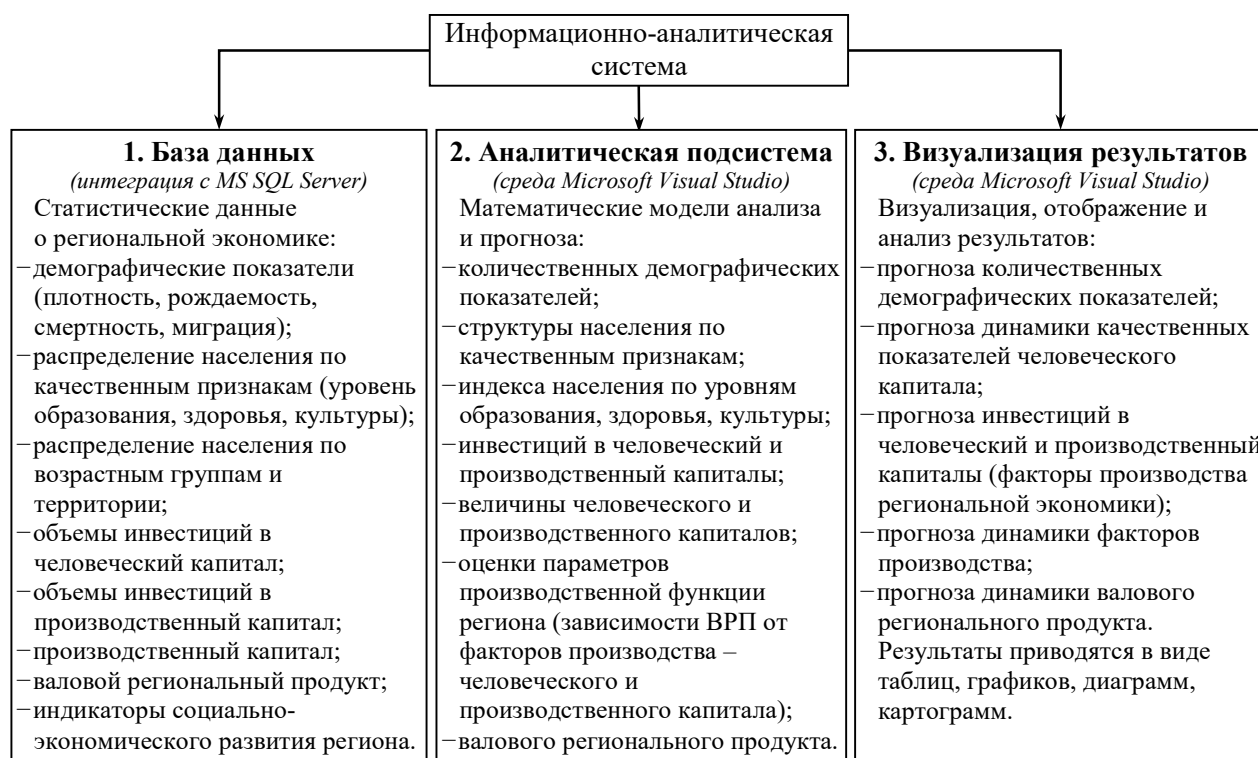


Рис. 4 – Структура ИАС «Моделирование и прогнозирование показателей социально-экономических процессов региона»

ИАС состоит из трех блоков: база данных, аналитическая подсистема и блок визуализации. База данных разработана в MS SQL Server, содержит стати-

стические данные по социально-экономическим показателям развития регионов, размещенных на официальных сайтах государственной статистики, Федерального казначейства РФ, министерств и ведомств. Второй блок ИАС – это аналитическая подсистема, разработанная в среде программирования *Microsoft Visual Studio*. В ней реализована методика прогнозирования показателей социально-экономических процессов. Третий блок ИАС представляет собой подсистему отображения и визуализации результатов моделирования и прогнозирования показателей социально-экономических процессов в регионе.

Результаты моделирования количественной составляющей ЧК УР за период 2000-2020 годы представлены на рис. 5, а-г.

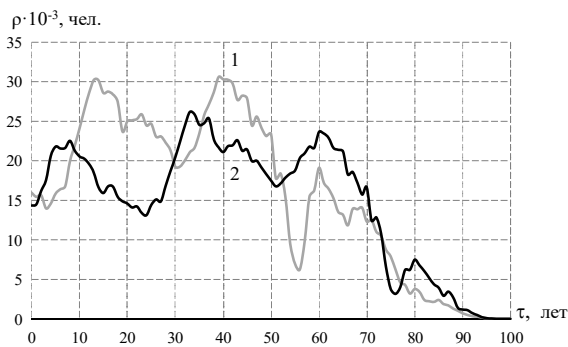


Рис. 5,а – Плотность распределения населения  $\rho(t, \tau)$  в УР в 2000 г. (1) и в 2020 г. (2)

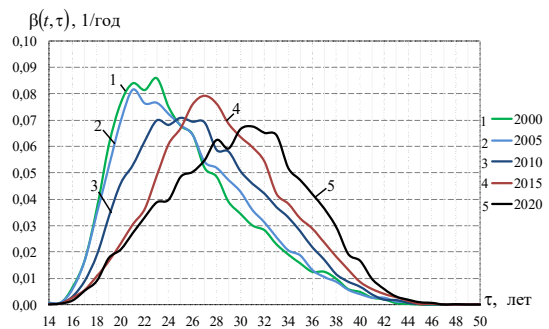


Рис. 5,б – Коэффициенты распределения рождений  $\beta(t, \tau)$  для УР за период 2000-2020 гг.

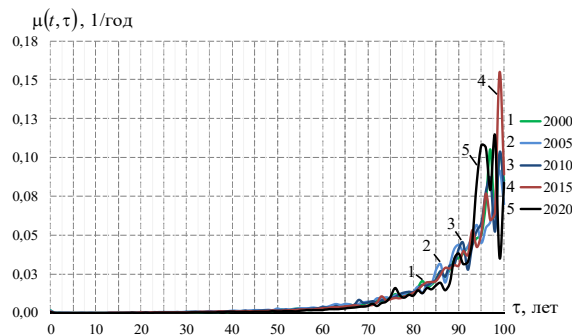


Рис. 5,в – Коэффициенты распределения смертности  $\mu(t, \tau)$  для УР за период 2000-2020 гг.

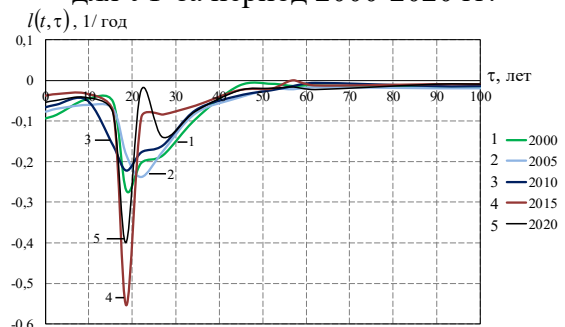


Рис. 5,г – Коэффициенты миграционного взаимодействия  $l(t, \tau)$  для УР за период 2000-2020 гг.

На рис. 6, а-в приведены результаты структурно-динамического анализа по качественным составляющим человеческого капитала социально-экономической системы Удмуртской Республики.

На рис. 7, а-в представлена динамика бюджетных и частных инвестиций в текущих ценах за 2000-2020 годы и их прогноз, полученный с использованием обученной ИНС, учитывающей факторы внешней среды, на период до 2025 года. Для тестирования нейросетевого алгоритма рассмотрен участок ретропрогноза  $t \in [2015; 2020]$  годы. Средняя погрешность модельных значений составляющих ЧК на участке ретропрогноза составила 3-5%.

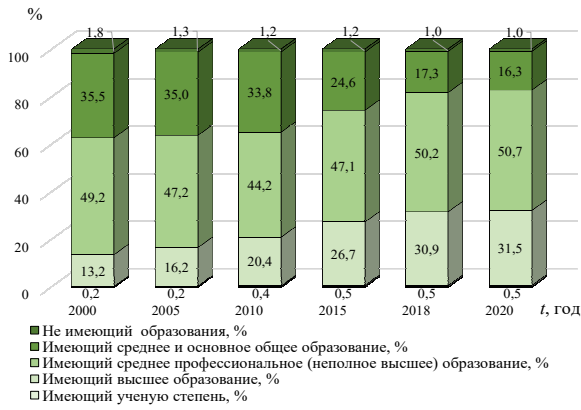


Рис. 6,а – Динамика структуры населения по составляющей образования

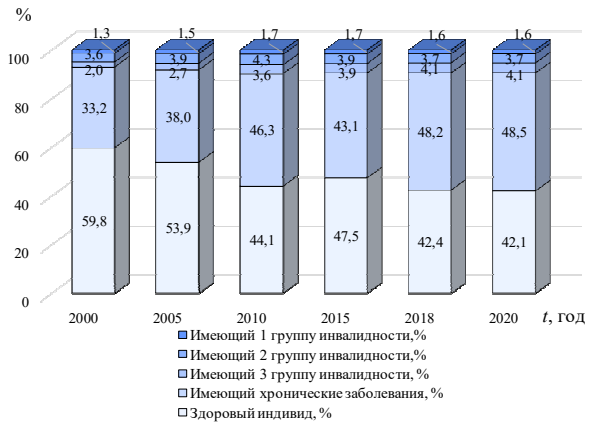


Рис. 6,б – Динамика структуры населения по составляющей здоровья

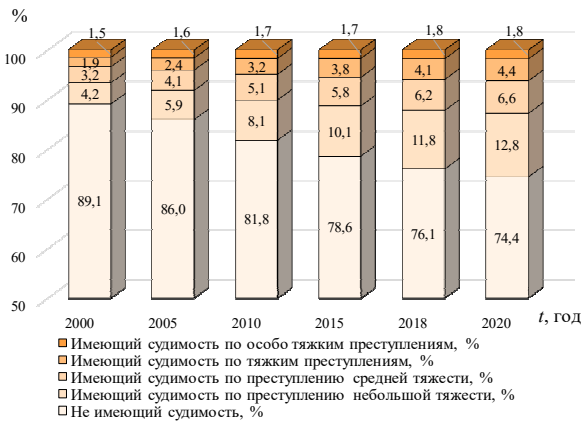


Рис. 6,в – Динамика структуры населения по составляющей культуры

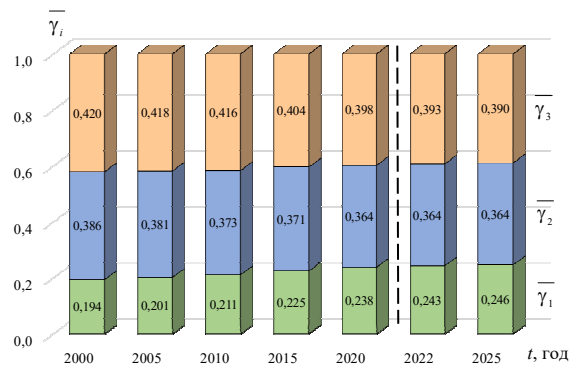


Рис. 6,г – Динамика весовых коэффициентов составляющих ЧК

На исследуемом наборе данных нейросетевой алгоритм, учитывающий влияние внешних факторов, позволил достичь более высокой точности на участке ретропрогноза по сравнению с алгоритмом без учета внешних факторов социально-экономической системы: точность прогноза повысилась на 7-9 %.

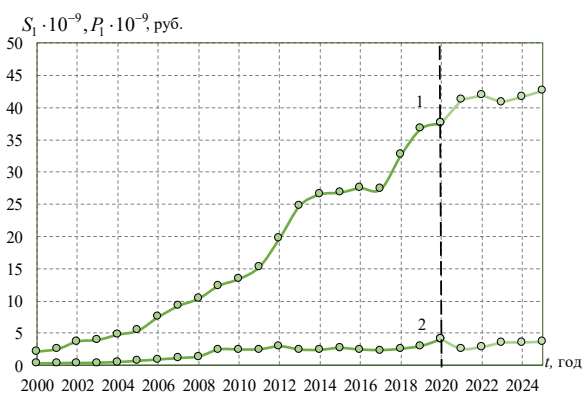


Рис. 7,а – Динамика инвестиций в образование населения УР в текущих ценах за 2000-2020 гг. и их прогноз до 2025 г.: бюджетные (1), частные (2)

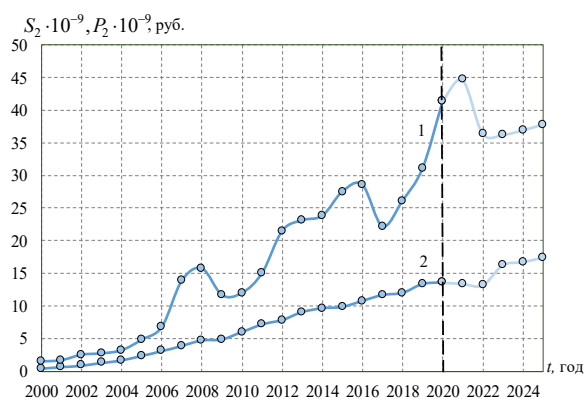


Рис. 7,б – Динамика инвестиций в здоровье населения УР в текущих ценах за 2000-2020 г. и их прогноз до 2025 г.: бюджетные (1), частные (2)



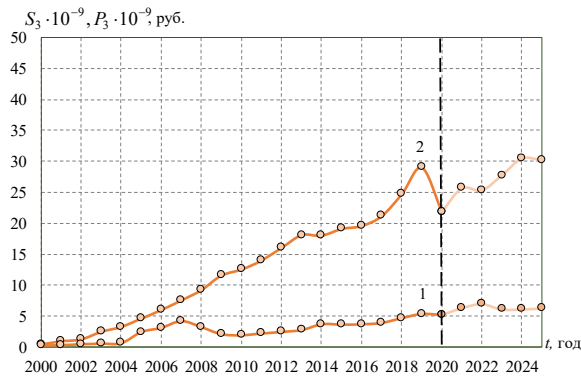


Рис. 7, в – Динамика инвестиций в культуру населения УР в текущих ценах за 2000-2020 гг. и их прогноз до 2025 г.: бюджетные (1), частные (2)



Рис. 8, а – Динамика изменения производственного капитала УР до 2025 г. в ценах 2020 г.



Рис. 8, б – Цветограмма распределения производственного капитала регионов ПФО в 2020 г. в ценах 2020 г.



Рис. 9, а – Динамика изменения человеческого капитала УР до 2025 г. в ценах 2020 г.



Рис. 9, б – Цветограмма распределения человеческого капитала регионов ПФО в 2020 г. в ценах 2020 г.

На рис. 8-9 показаны результаты прогнозирования динамики производственного капитала и ЧК для УР и регионов Приволжского федерального округа (ПФО), полученные с помощью ИАС. Исследования показали, что в начале анализируемого периода происходит снижение производственного капитала УР с последующей его стабилизацией, включая период прогноза до 2025 года (см. рис. 8, *a*). Что касается величины ЧК, то наблюдается его устойчивый рост, начиная с 2012 года, который сохраняется и в прогнозный период (см. рис. 9, *a*).

Модель ЧК позволяет проводить анализ и прогноз его динамики и динамики его составляющих как по времени, так и по возрасту населения. Для примера рассмотрим изучаемые показатели в некоторых разрезах. На рис. 10 дано изменение ЧК различных возрастных групп УР ( $\tau = 20$  лет,  $\tau = 40$  лет,  $\tau = 60$  лет), а также приведен прогноз его значений до 2025 года.

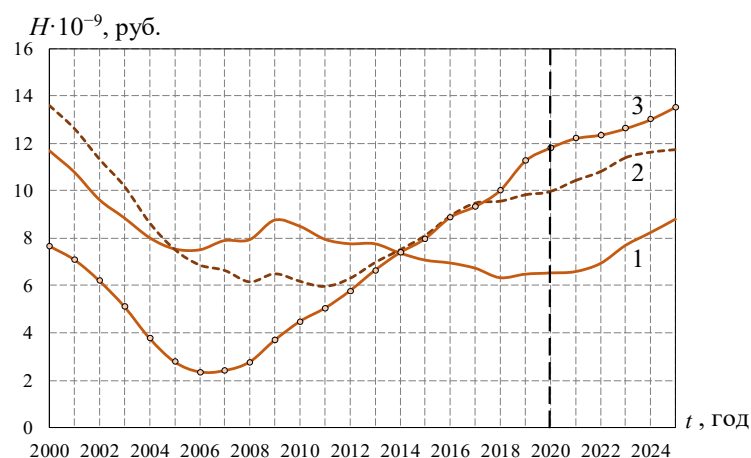


Рис. 10 – Динамика ЧК различных возрастных групп УР за период 2000-2020 гг. и прогноз до 2025 г.: 20 лет (1), 40 лет (2), 60 лет (3)

Видно, что в первой трети периода ЧК всех рассматриваемых возрастных групп снижается. Далее идет быстрый рост ЧК группы  $\tau = 20$  лет, что обусловлено большой долей капиталовложений в эту возрастную группу. Рост ЧК группы  $\tau = 60$  лет с 2006 года объясняется увеличением численности людей данного возраста (рис. 11). Умеренный рост ЧК группы  $\tau = 40$  лет обусловлен снижением численности людей этой трудоспособной группы населения и относительно небольшими инвестициями в неё со стороны государства.

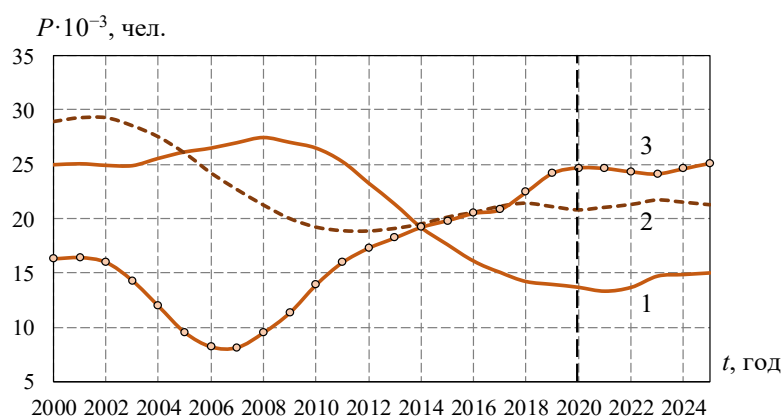


Рис. 11 – Динамика численности различных возрастных групп УР за период 2000-2020 гг. и прогноз до 2025 г.: 20 лет (1), 40 лет (2), 60 лет (3)

Рассмотрены 3 варианта развития ситуации, которые позволяют лицу, принимающему решение (ЛПР) обосновать стратегию социально-экономического развития в регионе: базовый, оптимистический и пессимистический прогноз.

Базовый прогноз – прогноз, полученный по исходной статистической информации, на основе разработанного нейросетевого алгоритма прогнозирования количественных и качественных составляющих ЧК с учетом индикаторов социально-экономического развития региона.

Оптимистический прогноз предполагает, что реализуется максимальный темп роста инвестиций, наблюдавшийся в период 2000-2020 годы в социально-экономической системе УР. Так, для реализации оптимистического прогноза зафиксируем изменение инвестиций в 3 составляющие ЧК на их наибольшем уровне за период 2000-2020 годы (образование – темп роста 12,4% в 2002 году, здоровье – 114,9% в 2007 году, культура – 124,8% в 2003 году).

Пессимистический прогноз предполагает, что инвестиции в составляющие ЧК отходят от тенденции их существенного увеличения в последние годы и будут зафиксированы на более низком уровне (минимальная за рассматриваемый период величина инвестиций в каждую составляющую ЧК в сопоставимых ценах 2020 года). На рис. 12 представлены сценарии развития ЧК УР до 2025 года.

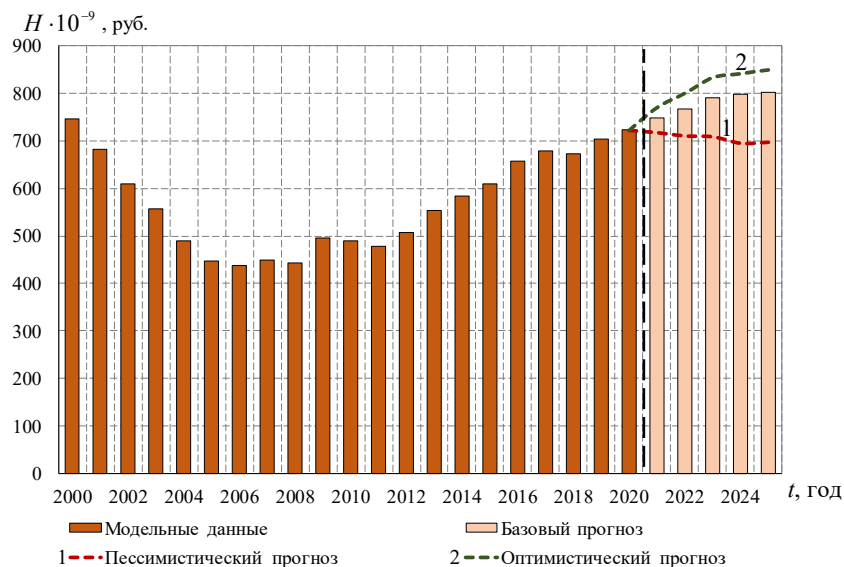


Рис. 12 – Сценарии развития ЧК региона до 2025 г. в ценах 2020 г.

Оптимистический прогноз развития ЧК УР, включающий ускорение темпов объема инвестирования в составляющие человеческого капитала по сравнению с 2020 годом, предполагает ежегодное увеличение ЧК на 2,5%. Согласно оптимистическому прогнозу, к 2025 году прогнозируется величина ЧК УР, равная 848,9 млрд. руб. Динамика ЧК по оптимистическому прогнозу в среднем на 5,1% больше значения ЧК по базовому прогнозу.

Пессимистический прогноз развития ЧК УР, отражающий замедление темпов объема инвестирования по сравнению с 2020 годом, предполагает его ежегодное снижение на 0,7%. Согласно данному прогнозу, к 2025 году прогнозируется величина ЧК УР, равная 695,9 млрд. руб. Динамика ЧК по пессимистическому прогнозу в среднем на 11,4% меньше значения ЧК по базовому прогнозу.

Для достижения показателя ЧК по оптимистическому сценарию ЛПР закладывает в стратегию социально-экономического развития региона необходимый объем инвестиций, направленных в ЧК. Эффект оценивается возможностью лица, принимающего решение, формировать приоритетные направления социально-экономической, бюджетной и инвестиционной политики региона.

***Опыт внедрения результатов диссертационного исследования:***

**- в учебный процесс:** результаты диссертационного исследования в виде: методики количественной оценки величины ЧК; нейросетевого алгоритма прогнозирования количественных и качественных составляющих ЧК; математических моделей, описывающих демографические процессы, структурную динамику населения по качественным признакам, зависимость макроэкономических показателей от факторов производства в региональной системе; структурированной базы данных статистических показателей УР за период 2000-2020 годы; компьютерной программы, в которой реализовано совместное решение задач моделирования, прогнозирования и параметрических исследований показателей социально-экономических процессов, определяющих величину и динамику ЧК населения были использованы в ФГБОУ ВО «Ижевский государственный университет имени М.Т. Калашникова» при разработке лабораторных и курсовых работ по дисциплинам «Математическое моделирование», «Эконометрика», «Методы оптимизации и теория оптимального управления» и «Проектирование программного обеспечения» для подготовки бакалавров и магистров направления «Прикладная математика».

**- в научный процесс:** результаты диссертационного исследования были использованы при выполнении научно-исследовательского гранта ФГБОУ ВО «ИжГТУ имени М.Т. Калашникова» №01.04.04/18ККВ от 29.12.2018 г. на 2019-2020 гг. по теме: «Анализ демографических процессов и исследование динамики человеческого капитала региона (на примере Удмуртской Республики)».

**- в рабочий процесс:** результаты диссертационного исследования внедрены в деятельность автономной некоммерческой организации «Цифровая экономика УР», финансируемой из средств федерального бюджета в рамках реализации программы «Цифровая экономика РФ» и имеющей своей задачей выполнение проектов, формируемых в министерствах и ведомствах на территории региона. Результаты моделирования и прогнозирования социально-экономических процессов в УР использованы АНО «Цифровая экономика УР» при реализации проектов цифровой трансформации в рамках национальных проектов «Цифровая экономика».

В рамках национального проекта «Демография» АНО «Цифровая экономика УР» использованы: математические модели показателей демографических процессов – для оценки состояния населения и его воспроизводства в регионе и прогноза плотности населения, рождаемости, смертности, естественного прироста населения, миграции в УР на среднесрочный период; разработанная информационно-аналитическая система – для информационно-справочного обслуживания, при котором данные выдаются по нерегулярным запросам пользователей в виде специально разработанных таблиц, графиков и диаграмм.

В рамках проекта Министерства экономики «Разработка прогноза социально-экономического развития УР на среднесрочный период» АНО «Цифровая экономика УР» использованы: функция взаимосвязи производственных ресурсов и конечного выпуска продукции – для прогноза валового регионального продукта (ВРП) УР; подход, использованный для параметрических исследований динамики развития ЧК – для имитационного сценарного моделирования, в частности, для расчета перспективной динамики ВРП УР в зависимости от изменения объема инвестиций в основные факторы развития экономики; нейросетевой алгоритм – для решения задачи построения зависимости валового регионального продукта от совокупного объёма инвестиций в экономику УР за счёт всех источников финансирования с учетом отложенного временного фактора.

Использование разработанных алгоритмов и программного обеспечения позволило снизить время, затрачиваемое на анализ и построение прогнозов исследуемых показателей социально-экономического развития региона, в 2-3 раза, а также повысить точность прогнозов: средняя относительная ошибка прогнозирования показателей снизилась до 3-5 %.

Использование результатов диссертационной работы, интегрированных в ИАС, при построении стратегии социально-экономического развития предоставляет возможность ЛПР выбрать наиболее оптимальный план стратегического развития территории.

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

1. Разработана методика количественной оценки и прогноза величины человеческого капитала. Математическая модель оценки человеческого капитала учитывает вклад качественной структуры населения и временно-возрастное распределение государственных и частных капиталовложений в его составляющие: образование, здоровье и культуру.

2. Реализован вычислительный нейросетевой алгоритм прогнозирования количественных и качественных составляющих человеческого капитала с учетом влияния факторов внешней среды региональной социально-экономической системы. Показано, что учет факторов внешней среды позволяет снизить погрешность прогнозирования на 7-9 %.

3. Создана новая ИАС, включающая, в отличие от существующих, определение величины и динамики ЧК населения. ИАС содержит базу данных, аналитическую подсистему и визуализирует результаты. База данных представляет собой разработанную структуру взаимосвязанных блоков статистической информации по УР и другим регионам ПФО за период 2000-2020 годы. В аналитической подсистеме реализованы разработанные математические модели и алгоритмы моделирования и прогнозирования показателей социально-экономических процессов. Подсистема визуализации расчетов в ИАС выполняет функцию информационной поддержки. Разработанное ПО позволяет рассчитывать величину и динамику новых, ранее не моделированных, показателей, таких как человеческий капитал, индексы образования, здоровья, культуры и др. При этом

построение прогнозов происходит в адаптивном режиме с учетом вновь поступающей информации.

4. Впервые выполнено комплексное исследование показателей социально-экономических процессов УР, позволяющее оценить влияние количественных и качественных характеристик различных групп населения на динамику человеческого капитала. Результаты численных исследований показали, что для УР в интервале с 2000 по 2008 годы наблюдается снижение величины ЧК с ежегодным темпом 6,3%; в 2008 году величина ЧК составила 442,5 млрд. руб. Далее, до 2020 года, наблюдается заметный рост ЧК со средним ежегодным темпом 4,1% и его величина в 2020 году составит 721,7 млрд. руб. В расчете на одного жителя региона, величина ЧК составляет 480,8 тыс. руб. Основной вклад (более 65 %) в величину ЧК вносит образовательная составляющая.

5. Проведены параметрические исследования ЧК (базовый, оптимистический и пессимистический прогноз), которые позволяют ЛПР формировать стратегию социально-экономического развития в регионе. Согласно базовому прогнозу, средний темп роста ЧК на период 2021-2025 годы составит 2,1% в год. Оптимистический прогноз ЧК построен на предположении, что реализуется максимальный темп роста инвестиций, наблюдавшийся в период 2000-2020 годы. Согласно оптимистическому прогнозу, к 2025 году величина ЧК УР достигнет 848,9 млрд. руб., при этом ежегодный темп роста ЧК 2,5%. Пессимистический прогноз предполагает, что инвестиции в человеческий капитал отходят от тенденции увеличения, наблюдавшейся в последние годы, и будут зафиксированы на их среднем уровне в период 2000-2020 годы. В таком случае, к 2025 году прогнозная величина ЧК УР составит 695,9 млрд. руб., при этом ежегодный темп снижения ЧК 0,7%.

6. Результаты, полученные в диссертации, использованы в научно-образовательном процессе «ИжГТУ имени М.Т. Калашникова» и в рабочем процессе АНО «Цифровая экономика УР». Использование разработанных алгоритмов и ПО позволило снизить время, затрачиваемое на анализ и построение прогнозов исследуемых показателей, в 2-3 раза, а также повысить точность прогнозов: средняя относительная ошибка прогнозирования показателей снизилась до 3-5 %. Достигнутые в работе результаты использованы при формировании программ социально-экономического развития в рамках реализации национальных проектов федеральной программы «Цифровая экономика». Разработанная ИАС позволяет профильным министерствам и ведомствам проводить оценку тенденций изменения социально-экономических показателей регионов и их сравнительный анализ для различных регионов РФ.

## **СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ ПО ТЕМЕ ИССЛЕДОВАНИЯ**

### **Публикации в ведущих рецензируемых научных изданиях из перечня ВАК и приравненных к ним**

1. Кетова К.В., Русяк И.Г., Вавилова Д.Д. Математическое моделирование и нейросетевое прогнозирование структуры и динамики человеческого капитала

РФ // Вестник Томского государственного университета. Управление, вычислительная техника и информатика. 2020. № 53 (4). С.13-24. [DOI:10.17223/19988605/53/2](https://doi.org/10.17223/19988605/53/2) (индексируется в **Web of Science, Scopus**).

2. Кетова К.В., Вавилова Д.Д. Оценка тенденций изменения человеческого капитала социально-экономической системы на основе применения алгоритма нейросетевого прогнозирования // Экономические и социальные перемены: факты, тенденции, прогноз. 2020. Т. 13. № 6. С.126-142. [DOI:10.15838/esc.2020.6.72](https://doi.org/10.15838/esc.2020.6.72) (индексируется в **Web of Science**).

3. Ketova K.V., Rusyak I.G., Saburova E.A., Vavilova D.D. Regional socio-economic parameters modeling and system analysis by means of programming and computing suite // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2020. № 862. 052044. [DOI:10.1088/1757-899X/862/5/052044](https://doi.org/10.1088/1757-899X/862/5/052044) (индексируется в **Scopus**).

4. Ketova K.V., Vavilova D.D. Modelling a human capital of an economic system with neural networks // Journal of Physics: Conference Series. 2020. №1703. 012035. [DOI:10.1088/1742-6596/1703/1/012035](https://doi.org/10.1088/1742-6596/1703/1/012035) (индексируется в **Scopus**).

5. Ketova K.V., Kasatkina E.V., Vavilova D.D. Development of an effective adaptive forecasting system based on the combination of neural network and genetic algorithm // Journal of Physics: Conference Series. 2021. № 1889(3). 032029. [DOI:10.1088/1742-6596/1889/3/032029](https://doi.org/10.1088/1742-6596/1889/3/032029) (индексируется в **Scopus**).

6. Кетова К.В., Касаткина Е.В., Насридинова Д.Д. Прогнозирование показателей социально-экономического развития региона // Экономические и социальные перемены: факты, тенденции, прогноз. 2013. № 4 (28). С.104-120.

7. Касаткина Е.В., Вавилова Д.Д. Информационно-аналитическая система прогнозирования обобщающих показателей социально-экономического развития региона // Проблемы управления. 2015. № 4. С. 25-34.

8. Вавилова Д.Д., Кетова К.В. Прогнозирование показателей социально-экономического развития региона и сценарий экономического роста // Научные труды Вольного экономического общества России. 2015. Т. 194. С. 429-440.

9. Вавилова Д.Д., Кетова К.В. Нейросетевая модель прогнозирования человеческого капитала // Интеллектуальные системы в производстве. 2020. Т. 18. № 1. С. 26-35. [DOI:10.22213/2410-9304-2020-1-26-35](https://doi.org/10.22213/2410-9304-2020-1-26-35).

10. Кетова К.В., Вавилова Д.Д. Построение математических оценок культурной составляющей человеческого капитала // Интеллектуальные системы в производстве. 2021. Т. 19. С. 100-111. [DOI:10.22213/2410-9304-2021-1-100-111](https://doi.org/10.22213/2410-9304-2021-1-100-111).

11. Кетова К.В., Вавилова Д.Д. Структурно-динамический анализ составляющей здоровья человеческого капитала социально-экономической системы // Статистика и Экономика. 2021. Т. 18. № 1. С. 54-66. [DOI:10.21686/2500-3925-2021-1-54-66](https://doi.org/10.21686/2500-3925-2021-1-54-66).

**Публикации в прочих изданиях РИНЦ,  
в том числе материалы конференций**

12. Кетова К.В., Касаткина Е.В., Вавилова Д.Д. Application of Genetic Algorithm for Adjusting the Structure of Multilayered Neural Network for Prediction of Investment Processes // Материалы VIII Международной конференции «Техни-

ческие университеты: интеграция с европейскими и мировыми системами образования», Ижевск, 2019. Т. 1. С. 223-233.

13. Вавилова Д.Д. Оптимизация структуры нейронной сети с использованием генетического алгоритма // Сборник научных статей II Всероссийской научной конференции с международным участием «Информационные технологии в моделировании и управлении: подходы, методы, решения». 2019. С. 97-101.

14. Вавилова Д.Д., Кетова К.В. Практика применения нейросетевого моделирования для прогнозирования социально-экономических процессов // Сборник статей IV Международной научно-технической конференции «Информационные технологии в моделировании и управлении». Тольятти, 2020. С.213-217.

15. Кетова К.В., Русяк И.Г., Вавилова Д.Д. К вопросу о применении нейронных сетей для решения задачи кластеризации социума // Бюллетень науки и практики. 2020. Т.6. № 8. С.19-33.

16. Кетова К.В., Вавилова Д.Д., Кузьмин М.С. Анализ структуры населения по уровню образования // Международный журнал гуманитарных и естественных наук. 2020. № 6-2 (45). С. 27-34.

17. Кетова К.В., Касаткина Е.В., Вавилова Д.Д. Экономико-математическое моделирование макроэкономических показателей региона с использованием программно-вычислительного комплекса // Евразийское Научное Объединение. 2020. № 3-3 (61). С. 176-180.

18. Вавилова Д.Д. Культурная составляющая человеческого капитала: социально-экономическое исследование на примере Удмуртской Республики // Скиф. Вопросы студенческой науки. 2021. № 2 (54). С. 76-85.

19. Кетова К.В., Вавилова Д.Д. Индекс здоровья населения экономической системы: региональный аспект // Studnet. 2021. Т. 4. № 1. С. 125.

### **Свидетельства о государственной регистрации программ**

20. Насридинова Д.Д., Касаткина Е.В., Кетова К.В. Программа структурной оптимизации прогнозных нейросетевых моделей // Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ 2014618038. Заявка №2014615568 от 10.06.2014.

21. Вавилова Д.Д. Программа нейросетевого моделирования и прогнозирования инвестиционных процессов // Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ 2019667497. Заявка № 2019666706 от 16.12.2019.

22. Вавилова Д.Д., Кетова К.В. Информационно-аналитическая система «Моделирование и прогнозирование показателей социально-экономических процессов региона» // Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ 2022619947. Заявка № 2022619240 от 19.05.2022.