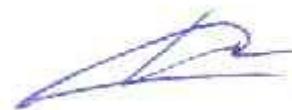


На правах рукописи



СИРОТИНА НАТАЛЬЯ АЛЕКСАНДРОВНА

**КОНЕЧНО-РАЗНОСТНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ
И УПРАВЛЕНИЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ РЕГИОНАЛЬНОГО
ПРИРОДНО-РЕСУРСНОГО ПОТЕНЦИАЛА**

2.3.4. Управление в организационных системах

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Пермь, 2023

Диссертационная работа выполнена на кафедре «Автоматизация технологических процессов» Березниковского филиала федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Пермский национальный исследовательский политехнический университет».

Научный руководитель: **Затонский Андрей Владимирович**
доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты: **Баркалов Сергей Алексеевич,**
доктор технических наук, профессор,
ФГБОУ ВО «Воронежский государственный
технический университет».
декан факультета экономики, менеджмента и
информационных технологий

Иващенко Антон Владимирович,
доктор технических наук, профессор,
ФГБУ «Ордена Трудового Красного Знамени
Российский научно-исследовательский
институт радио имени М.И. Кривошеева».
Самарский филиал – «СОНИИР»,
ведущий научный сотрудник Научно-
технического центра ПР 048

Ведущая организация: Институт проблем управления сложными
системами Российской академии наук –
обособленное подразделение ФГБУ науки Са-
марского федерального
исследовательского центра Российской
академии наук, г. Самара

Защита состоится «29» июня 2023 года в 16:30 на заседании диссертационного совета Д ПНИПУ.05.21, созданного на базе ФГАОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет» по адресу: 614990, г.Пермь, Комсомольский проспект, дом 29, аудитория 345.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГАОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет» (<http://www.pstu.ru>).

Автореферат разослан « » 2023 года.

Ученый секретарь диссертационного совета, кандидат экономических наук, доцент

Алексеев Александр Олегович

I. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Социально-экономическое развитие отдельного региона и страны в целом зависят от наличия природных ресурсов. Природно-ресурсный потенциал (ПРП) региона является не только ключевым фактором, определяющим производительные силы, но и базой функционирования соответствующих производственных кластеров. Природно-ресурсный потенциал определяет структуру занятости в регионе и его отраслевую специализацию, его развитие и правильное использование позволяет повысить региональный экономический потенциал. При этом общепринятого комплексного критерия ПРП, формирование (обоснование) которого не зависит от предпочтений заинтересованных лиц, не существует. Это затрудняет возможности эффективного прогнозирования и управления природными ресурсами региона, что определяет актуальность исследования.

Эффективное развитие региона на базе его ПРП предполагает наличие инструмента объективной оценки достигнутого уровня, прогнозирования возможных направлений его развития и оценки последствий принятия конкретных решений по управлению им. Однако применяющиеся в настоящее время для этих целей инструменты управления ПРП региона создавались на основании статистике (истории) потребления. Модели такого типа используются для прогнозирования будущего состояния управляемой организационной системы, исходя из процессов, происходивших в прошлом. Однако подобный подход не позволяет предусмотреть влияние на результат эволюции динамических свойств самой системы. По этой причине моделирование ПРП с целью прогнозирования возможностей развития региона как крупномасштабной организационной системы актуально непосредственно как объект исследования. Кроме того, разработка и реализация данного метода и применение его для прогнозирования ПРП Пермского края, обладает практической значимостью также для этого региона.

Степень разработанности темы исследования. Исследования, посвященные проблемам управления природными ресурсами – прогнозированию, оценке состояния, эффективности использования, т.п. – связаны с именами зарубежных и отечественных авторов, таких как П.А. Бакланов, Ш.Ш. Байбусинов, И.П. Герасимов, А.А. Гусев, С.А. Кимельман, В.В. Козельский, Н.Н. Лукьянчиков, О.Е. Медведев, И.М. Потравный, В.П. Руденко, Г. Хаазе, В.Н. Чапек и др. На региональном уровне этими проблемами занимались: С.В. Глухова, В.Г. Логинов, М.Н. Михайлюк, О.А. Ушакова.

Разработке экономико-математических моделей для оценки экономической эффективности развития отдельного региона, в том числе его ПРП, посвящены работы С.А. Дзюба, Е.Б. Мицека, Е.С. Мелехина, Т.Г. Морозовой, И.Ю. Новоселовой, А.И. Орлова.

Проблематике прогнозных моделей организационных систем уделяли внимание Р.А. Файзрахманов, А.А. Акаев, С.В. Гайдомак, Т. В. Кочубей, Л.Л. Львова, А.И. Меркулов, С.В. Макаров О.Б. Низамутдинов, А.А. Первозванский, В.С. Пронькин, О.В. Шулико, С.К. Шиндин, Б.И. Эфендиев и др.

В исследованиях на базе экономико-математического анализа и прогнозирования традиционно используются линейные многофакторные модели (ЛММ) или тренды. В то же время, в реальности крупномасштабные организационные системы по своей природе динамичны, и для их прогнозирования целесообразно использовать нелинейные модели, поскольку прогнозные возможности ЛММ здесь достаточно ограничены. Кроме того, существующие дифференциальные модели организационных систем, как правило, сложны в оснащении и использовании, а для их идентификации недостаточно использовать только общедоступные статистические данные. Необходимость развития математического инструментария анализа и прогнозирования крупномасштабных организационных систем, который совмещал бы и вышеперечисленные достоинства, и относительную нетребовательность к первичным данным, возникает в силу его достаточно слабой разработанности.

Объект исследования – крупномасштабные организационные системы на примере природно-ресурсного потенциала Пермского края.

Предмет исследования – методы и алгоритмы оценки и управления развитием крупномасштабных организационных систем на основе прогнозных моделей, отличающихся высокой точностью.

Целью диссертационной работы является повышение эффективности управления ПРП Пермского края за счет возможности компенсационно устранить последствия негативного влияния неуправляемых факторов, путем разработки планомерного количественно определенного воздействия на управляемые факторы.

Для достижения указанной цели поставлены следующие **задачи**:

1. Провести анализ существующих методов и моделей оценки динамики развития крупномасштабных организационных систем с использованием общедоступных годовых рядов данных.

2. Выбрать состав отраслей народного хозяйства, адекватно определяющих ПРП регионов России, и факторов, влияющих на их уровень и динамику, на основании анализа стратегических программ федерального и регионального развития.

3. Предложить метод, позволяющий моделировать и прогнозировать динамично развивающиеся крупномасштабные организационные системы, основанный на использовании информации из открытых источников и обладающий приемлемыми прогностическими свойствами по сравнению с ЛММ.

4. Произвести моделирование динамики использования ПРП различных регионов Российской Федерации на различных временных интервалах, проанализировать влияние факторов и их сравнительную важность.

5. Сформулировать рекомендации по управлению ПРП Пермского края на основе прогнозных значений, рассчитанных в соответствии с предложенной моделью его развития путем подбора изменений одних факторов, позволяющих компенсировать негативную динамику других факторов.

Положения, выносимые на защиту и обладающие **научной новизной**.

1. Предложены методы математического моделирования динамики крупномасштабных организационных систем в задачах оперативного планиро-

вания, **отличающиеся** использованием регрессионных дифференциальных уравнений, что **позволяет** повысить эффективность и качество управления развитием ПРП региона по сравнению с традиционно используемыми моделями (п. 2 — Разработка математических моделей и критериев эффективности, качества и надежности организационных систем);

2. Разработан комплекс математических многофакторных моделей прогнозирования развития и оценки состояния ПРП и его составляющих на основании данных открытой статистики, **отличающийся** перечнем критериев и факторов, характеризующих региональные особенности и динамику рыночной конъюнктуры, что **позволяет** с достаточной точностью моделировать природно-ресурсный потенциал различных регионов РФ и эффективно управлять его развитием (п. 3 — Разработка методов и алгоритмов решения задач управления в организационных системах);

3. Разработан и обоснован метод поддержки принятия решений при управлении развитием ПРП Пермского края, являющегося крупномасштабной организационной системой, **отличающийся** использованием конечно-разностной регрессионной модели расчета комплексного показателя развития ПРП, что **позволяет** обоснованно выявлять положительные и отрицательные прогнозные области и на их основе синтезировать управленческие решения, ведущие к улучшению динамики системы в целом (п. 9 — Разработка методов и алгоритмов интеллектуальной поддержки принятия управленческих решений в организационных системах).

Теоретическая значимость диссертационного исследования состоит в разработке нового метода построения объясняющих динамических моделей к крупномасштабным организационным системам, пригодных для последующей поддержки принятия решений при управлении ими.

Практическая значимость выполненного исследования состоит в возможности использования его результатов исполнительными органами государственной власти регионального и муниципального уровней управления, вузами при подготовке профильных специалистов, экологическими и иными общественно-политическими организациями для поддержки разработки и принятия управленческих решений.

Результаты работы использованы в учебном процессе в Березниковском филиале Пермского национально-исследовательского политехнического университета. Работа частично выполнялась при поддержке гранта Министерства образования и науки РФ 8.8544.2013.

Методология и методы исследования. Методологическую основу исследований составили работы зарубежных и российских ученых и специалистов в области эконометрики и региональной экономики (в части оценки потенциала), экспертных оценок (факторизация, ранжирование, построение критериев), математического анализа (обыкновенные дифференциальные уравнения), вычислительной математики (решение дифференциальных уравнений, оптимизация), регрессионного анализа (применительно к обыкновенным дифференциальным уравнениям).

Степень достоверности и апробация работы. Достоверность результатов исследования обеспечена системным подходом к решению задачи моделирования природно-ресурсного потенциала региона; использованием данных открытой статистики; применением современных проверенных математических методов и средств моделирования; апробацией на примере различных регионов и временных интервалов различной длины.

Апробация результатов диссертационной работы проводилась на базе Березниковского филиала Пермского национального исследовательского политехнического университета. Акт о внедрении результатов диссертации включен в приложения к тексту работы.

Научные и практические результаты исследования и основные его положения докладывались и обсуждались на следующих конференциях: III Всероссийская конференция студентов и молодых ученых (г. Березники, 2012), II международная научно-практическая конференция «Научный поиск в современном мире» (г. Москва, 2012), II международная научно-практическая конференция «Общество на рубеже эпох: взгляд на современность через призму социальных и гуманитарных наук» (г. Пермь, 2012), VIII Международная научно-практическая конференция «Актуальные вопросы современной педагогической науки» (г. Чебоксары, 2013), Всероссийская научно-практическая конференция «Решение» (г. Березники, 2014, 2015, 2019, 2020, 2022), II Международная научная конференция «СAMS Tech-II 2021: Современные достижения в области материаловедения и технологий» – II International Scientific Conference on Advances in Material Science and Technology. (г. Красноярск, 2021), Всероссийская научно-техническая конференция «Автоматизированные системы управления и информационные технологии» (г. Пермь, 2021), Всероссийская (с международным участием) научно-практическая конференция «Основные тенденции развития инновационного предпринимательства в реальном секторе экономики в эпоху цифровизации: вызовы и возможности» (г. Москва, 2021), Всероссийская (с международным участием) научно-практическая конференция «Влияние цифровизации на инновационное предпринимательство и перспективы его развития в период цифровой трансформации» (г. Москва, 2022).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 16 научных работ, в том числе 6 статей в изданиях, включенных в Перечень ВАК, 2 статьи в изданиях, индексируемых в международной реферативной базе Scopus; получено 1 свидетельство о регистрации программы для ЭВМ.

Структура диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и приложений. Работа изложена на 181 странице, содержит 34 рисунка, 45 таблиц, 6 приложений. Список литературы включает 137 источников.

II. ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность, определены объект, цели и задачи исследования, практическая значимость, приведены положения, выносимые на защиту.

В первой главе рассмотрены теоретико-методологические подходы к описанию природно-ресурсного потенциала территории, охарактеризованы системообразующие факторы, формирующие природно-ресурсный потенциал территории и определяющие его уровень, а также существующие математические модели описания организационных систем (и ПРП в частности) и лежащие в основе методов управления ими.

Выделена и обоснована система факторов, которые формируют потенциал ПРП региона и способны определять его развитие, на примере Пермского края это такие факторы, как: посевные площади сельскохозяйственных культур, среднегодовая численность занятых в экономике, инвестиции в основной капитал предприятий, внесение удобрений и другие.

Выполнен обзор методов оценки показателей развития крупномасштабных организационных систем, в частности, уровня природно-ресурсного потенциала региона. Названы особо важные причины ограниченности в использовании с данной целью наиболее распространенных методов, в частности, недостаточная обоснованность назначения весовых коэффициентов линейной свертки частных критериев. Математические модели крупномасштабных организационных систем, наиболее широко используемые для прогнозирования и управления – это такие, как: линейная-многофакторная модель (ЛММ), класс моделей в пространстве состояний (МПрС), бесфакторные модели наподобие авторегрессионных (АвРМ) или трендовых, включая модель Маркова. Во многих случаях они характеризуются хорошей аппроксимацией исходных данных и/или объясняющими свойствами, однако недостаточно эффективны для прогнозирования. Последнее можно обнаружить, используя метод постпрогноза.

Отмеченные в главе недостатки существующих научных продуктов далее устраняются в работе.

Вторая глава посвящена проблемам разработки новых математических моделей динамических организационных систем, в которых можно использовать общедоступные годовые ряды данных.

Обзор современных исследований, посвященных математическим моделям сложных организационных систем показал эффективность использования регрессионно-дифференциальных моделей (РДМ) вида

$$\frac{d^2 y(t)}{dt^2} + g \cdot \frac{dy(t)}{dt} = a + b \cdot y(t - \tau_0) + \sum_{i=1}^m c_i \cdot x_i(t - \tau_i) + \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m d_{ij} \cdot x_i(t - \tau_i) \cdot x_j(t - \tau_j), \quad (1)$$

где при $i=j \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m d_{ij} \cdot x_i(t - \tau_i) \cdot x_j(t - \tau_j) = \sum_{i=1}^m d_{ii} \cdot x_i(t - \tau_i) \cdot x_i(t - \tau_i) = \sum_{i=1}^m f_i \cdot [x_i(t - \tau_i)]^2$, g – коэффициент влияния первой производной $dy(t)/dt$; a – константа, характеризующая влияние второй производной $d^2y(t)/dt^2$ при построении тренда; b – коэффициент обратной связи, отражающий влияние моделируемой величины $y(t)$ на ее вторую производную $d^2y(t)/dt^2$; $c_i, i=1,2,\dots,m$ – коэффициенты влияния факторов; $d_{ij}, i \neq j$ – коэффициенты взаимного влияния факторов; $f_i, i=1,2,\dots,m$ – коэффициенты влияния квадратов факторов; τ_0 – запаздывание обратной связи; $\tau_i, i=1,2,\dots,m$ – запаздывание воздействия i -го фактора. Показано, что они дают более качественные постпрогнозы, чем ЛММ и МПрС. В качестве demonstra-

ционного примера построены РДМ 1-го порядка (РДМ-1) сельского хозяйства и РДМ-1 лесного хозяйства края, которые, очевидно, являются подсистемами ПРП.

Для моделирования выбранных организационных систем используется специальное программное обеспечение, разработанное в среде Borland C Builder (рис.1), которое позволяет одновременно производить поиск оценок коэффициентов (1) и подбор наилучшей аппроксимации значений факторов между годовыми отсчетами из перечисленных.

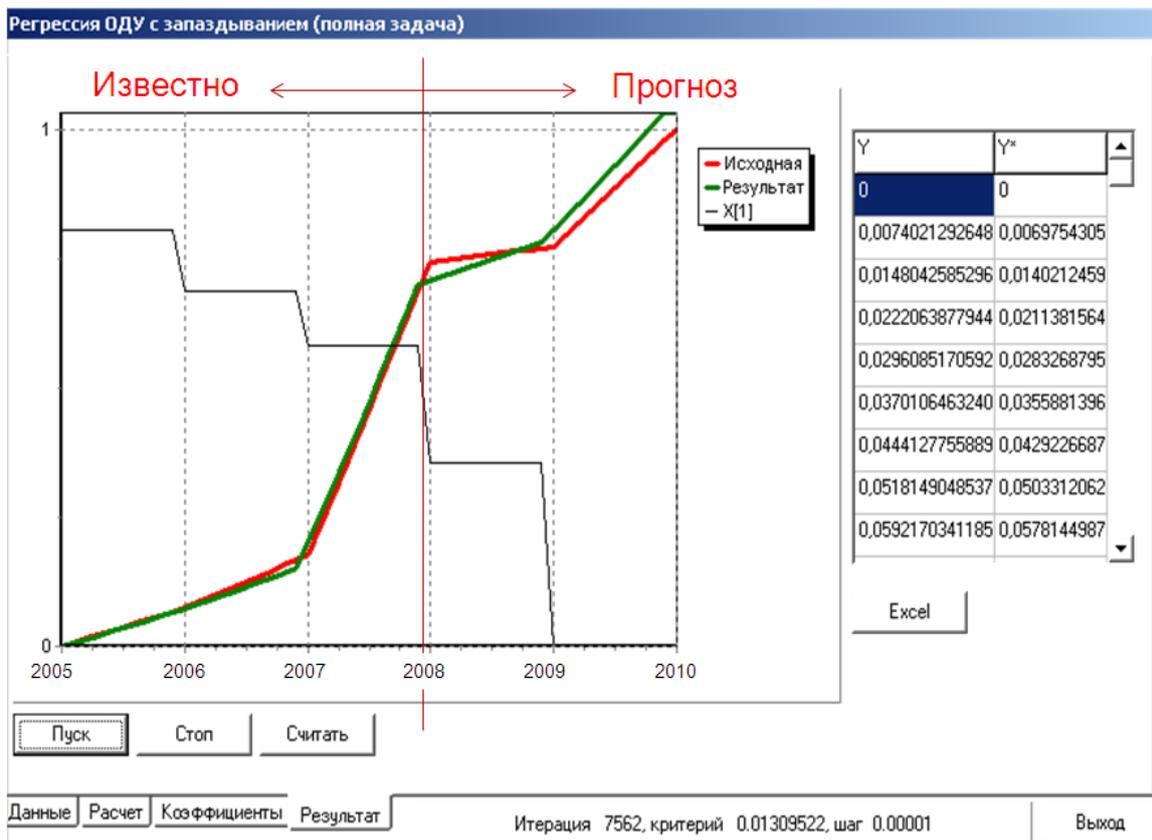


Рисунок 1 – Постпрогнозирование развития сельского хозяйства при ступенчатой аппроксимации факторов

РДМ-1 строились в виде решения задачи Коши

$$\begin{cases} \frac{dy(t)}{dt} = a_0 + \sum_{i=1}^5 a_i \cdot x_i(t) + a_6 \cdot y(t) = f(y(t), x(t), t) \\ y(0) = y_0 \end{cases} \quad (2)$$

Для исключения влияния размерности данные нормированы, а года пронумерованы. ОДУ (2) решалось явным модифицированным методом Эйлера 1-го порядка, в котором интегрирование происходит в два шага

$$\begin{cases} y^*(t + \Delta t) = y(t) + \Delta t \cdot f(y(t), x(t), t) \\ y(t + \Delta t) = y(t) + \Delta t \cdot f\left(\frac{y(t) + y^*(t)}{2}, x(t), t\right) \end{cases}$$

Аппроксимация реакции между отсчетами для РДМ-1 выбиралась линейной. Количество промежуточных точек между отсчетами, необходимых, чтобы метод численного решения (1) не расходился, принималось в интервале 10...20 и существенно не влияет на решение.

Определение значений коэффициентов производится минимизацией суммы по k -м отсчетам квадратичных отклонений данных y_i от исходных интерполированных значений y_r :

$$S = \sum_{k=1}^{51} (y_i(k) - y_r(k))^2$$

Индекс k уменьшается по мере перехода от исходной задачи к задаче постпрогноза. Коэффициенты a_i ЛММ, с которой производилось сравнение,

$$y(t) = a_0 + \sum_{i=1}^5 a_i \cdot x_i(t)$$

также определялись минимизацией соответствующей суммы S . Для оптимизации применяются методы покоординатного и градиентного спусков. При этом решение задачи каждым из методов может привести к локальному минимуму вместо глобального. Алгоритм реализован таким образом, что при достижении очередного минимума пытается определить, локальный он или глобальный. Для этого производится пошаговый поиск по каждой координате на значительное расстояние от найденной точки. Иногда это позволяет «выходить» из локальных минимумов.

Сделан вывод, что использование математических моделей в форме РДМ в задачах прогнозирования развития управляемых систем, предпочтительнее, чем ЛММ, в смысле адекватности и уменьшения возможного разброса прогнозов, необходимых для принятия решений. Однако РДМ имеют недостатки: сложная многоступенчатая процедура оценки коэффициентов модели, необходимость подбора параметров методов, зависимость результата от разбиения годового интервала. Поэтому оказалось целесообразным разработать модификацию РДМ, которая сохранила бы возможность к постпрогнозу, но этих недостатков была лишена. Если подставить в (1) формулы для численного дифференцирования $\frac{d^2Y(t_k)}{dt^2} \approx \frac{Y(t_k) - 2Y(t_{k-1}) + Y(t_{k-2}))}{\Delta t^2}$ и $\frac{dY(t_k)}{dt} \approx \frac{Y(t_{k-1}) - Y(t_{k-2}))}{\Delta t}$ по годовым отсчетам t_k , получим конечно-разностные модели (КРМ) 1-го и 2-го порядков

$$Y(t_k) \approx Y_{расч}(t_k) = a + (b + 1) \cdot Y(t_{k-1}) + \sum_{i=1}^m c_i \cdot X_i(t_k)$$

$$Y(t_k) \approx Y_{расч}(t_k) = a + (b + d + 2) \cdot Y(t_{k-1}) - (1 + d) \cdot Y(t_{k-2}) + \sum_{i=1}^m c_i \cdot X_i(t_k)$$

где коэффициенты получают вполне объяснимый «физический» смысл. Например, в уравнении, из которого получается КРМ-2

$$\frac{d^2Y(t_k)}{dt^2} = a + b \cdot Y(t_{k-1}) + \sum_{i=1}^m c_i \cdot X_i(t_k) + d \cdot \frac{dY(t_k)}{dt} \quad (3)$$

a – константа, характеризующая влияние второй производной $d^2Y(t_k)/dt^2$ при построении тренда; b – коэффициент обратной связи, отражающий влияние моде-

лируемой величины $Y(t)$ на ее вторую производную; d – коэффициент обратной связи, отражающий влияние первой производной моделируемой величины на вторую; $c_i, i=1,2,\dots,m$ – коэффициенты влияния факторов.

Само уравнение (3) в определенном смысле есть аналогия записи второго закона Ньютона: факторы «ускоряют» развитие организационных систем, то есть являются аналогами «сил» в механике; коэффициент d – аналог коэффициента лобового сопротивления в аэродинамике и т.д.

В предположении, что $b=c_{m+1}, d=c_{m+2}$, поиск коэффициентов также проводился минимизацией соответствующей суммы квадратов разностей

$$S(a, c_1, \dots, c_m, c_{m+1}, c_{m+2}) = \sum_{j=1}^J \left(a + \sum_{i=1}^{m+2} c_i \cdot X_i(t_k) - y_j \right)^2 \rightarrow \min.$$

Оценка неизвестных коэффициентов $a, c_1, \dots, c_m, c_{m+1}, c_{m+2}$ выполнена в среде MS Excel. Она позволяет сравнивать аппроксимацию и погрешности постпрогнозов на 1 и 2 года у ЛММ, КРМ-1 и КРМ-2 (рис. 2). В качестве начального приближения для КРМ-1 используются ранее полученные коэффициенты ЛММ, а для КРМ-2 – коэффициенты КРМ-1.

Обработано 59 наборов исходных данных, опубликованных ранее в работах предшествующих авторов. Важно, что во всех этих работах были даны непротиворечивые объяснения значений коэффициентов ЛММ, что доказывает их адекватность в целом. В большинстве случаев качество прогнозирования на основании обеих КРМ выше, чем на основании ЛММ: в 73,1% случаев хотя бы один прогноз КРМ оказывается лучше, чем ЛММ (в 25,0% случаев – все); в 35-39% случаев КРМ-прогнозы на 1 или 2 года оказываются лучше, чем у ЛММ и т.д.

Наилучшие результаты получены для КРМ-2, далее использованной в работе в качестве основной модели.

В **третьей главе** произведено построение КРМ-2 ПРП Пермского края. Обоснован выбор частных критериев, характеризующих ПРП с учетом местных особенностей:

Y_1 - Добыча нефти, включая газовый конденсат, тыс. т.

Y_2 - Добыча природного и попутного газов, млн. куб. м.

Y_3 - Производство удобрений минеральных или химических (в пересчете на 100%-содержание питательных веществ), тыс. т.

Y_4 - Продукция сельского хозяйства, млн. руб.

Y_5 - Производство деловой древесины, тыс. плотных м³.

Выбор весовых коэффициентов линейной свертки частных критериев

$$Y(t) = \sum_{i=1}^n \alpha_i \cdot Y_i(t),$$

может быть произведен экспертно, но в этом случае на конечный результат сильно влияют предпочтения экспертов. Этого можно избежать применением формального метода оценки рангов, основанного на максимальной гладкости комплексного критерия. Крупномасштабные организационные системы как правило инертны, т.е. не могут быстро изменяться во времени. Плавное изменение отдельных составляющих комплексного критерия позволяет предполо-

жить, что сам критерий также меняется слабо варьирует с течением времени. Это означает, что лучшим целесообразно считать такой набор рангов $R_i, i=1,2,\dots,n$, который обеспечивает минимум суммы квадратов отклонений последующего значения сводного критерия от его текущего значения т.е.:

$$\alpha_i = 1/R_i, \quad i=1,2,\dots,n; \quad S = \sum_{t=1}^{K-1} (Y(t) - Y(t+1))^2 \rightarrow \min. \quad (4)$$

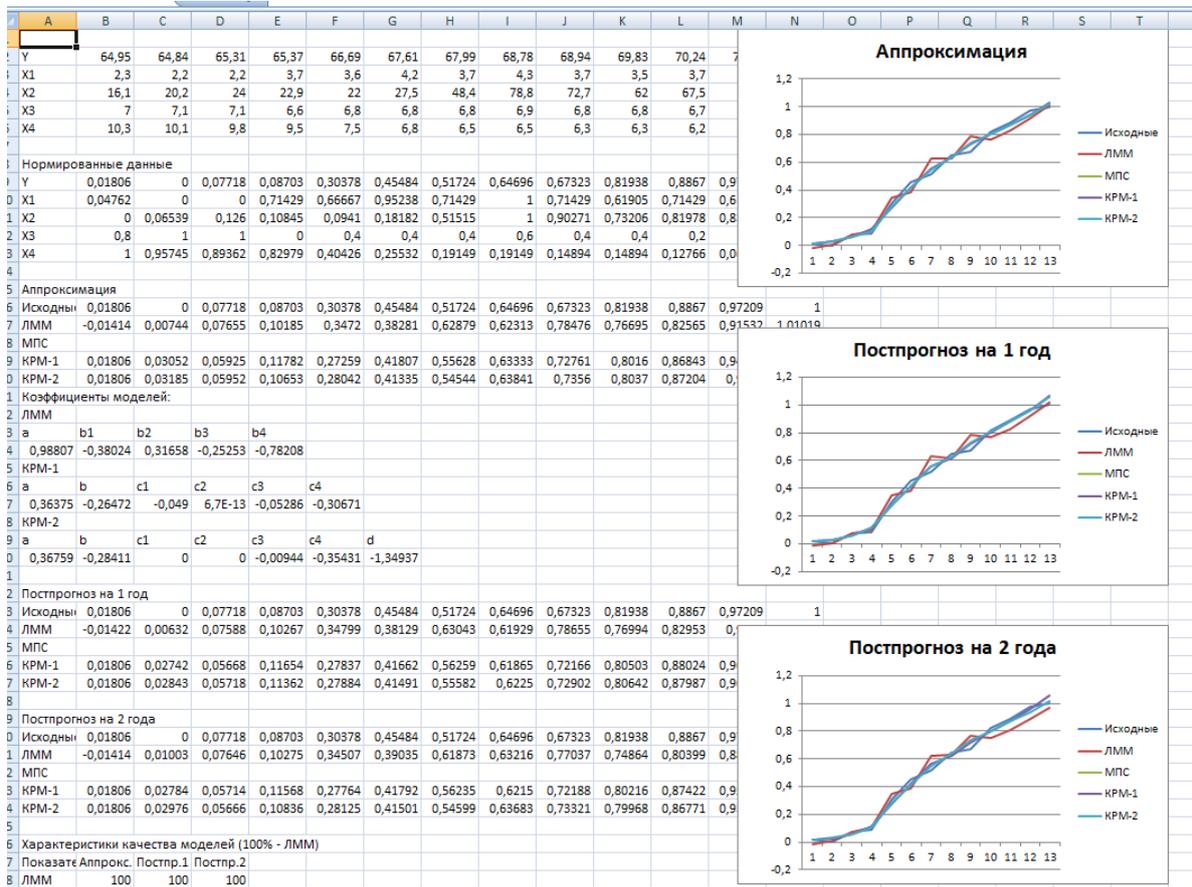


Рисунок 2 – ЛММ, КРМ-1 и КРМ-2: аппроксимация и постпрогнозы в MS Excel

Вес α_i – обратный рангу, т.е. $\alpha_i = 1/R_i, i=1,2,\dots,n$. При этом большему значению ранга соответствует меньший вес и, в таком случае, процедура расчета рангов сводится к полному перебору наборов их значений для выбора того из них, который обеспечивает минимум (4). Для указанного выше набора частных критериев наилучшая перестановка рангов 54213 дает значение характеристики (4) $S = 12,3\%$, что меньше, чем для напрашивающейся «экспертной» перестановки 12345 (14,1%).

Метод проверен также на примерах построения критериев развития ПРП для Ставропольского и Алтайского края. Каждому региону были выбраны частные критерии, отражающие особенности его ПРП. Так, для Ставропольского края – добыча нефти, добыча природного и попутного газов, производство минеральных удобрений, продукция с/х, число санаторно-курортных организаций; для Алтайского края – число организаций, оказывающих туристские и са-

наторно-оздоровительные услуги, объем добычи полезных ископаемых, продукция с/х и производство древесины.

В обоих случаях получены оптимальные ранжировки, имеющие логичное объяснение и очевидную предсказуемость. Это дает право заключить, что метод (4) формирования комплексного критерия с весами, обеспечивающими наибольшую гладкость, позволяет строить экономически корректную численную оценку ПРП для других регионов, а также корректна и оценка, полученная для ПРП Пермского края.

Четвертая глава посвящена построению КРМ ПРП Пермского края (ПРП ПК), а также формулированию рекомендаций по управлению им. Приведены факторы, определяющие потенциал экономики региона, способные влиять на динамику его ПРП:

X_1 - Посевные площади сельскохозяйственных культур, тыс. га

X_2 - Среднегодовая численность занятых в экономике, тыс. чел

X_3 - Инвестиции в основной капитал предприятий, млн. руб.

X_4 - Внесение минеральных удобрений, тыс. т.

X_5 - Внесение органических удобрений, тыс. т.

X_6 - Стоимость основных фондов на конец года, млрд. руб.

X_7 - Лесовосстановление, тыс. га.

X_8 - Число предприятий и организаций на конец года

X_9 - Цена нефти марки Brent (среднегодовое значение), USD за баррель

X_{10} - Экспорт продукции ТЭК, млн. USD.

На основании корреляционного анализа годовых рядов данных, исключены факторы 3 и 5 как имеющие высокую корреляцию с другими, этот результат подробно обоснован в тексте работы. Получена КРМ-2 ПРП в виде

$$\begin{aligned}
 Y_{\text{КРМ-2}}(t_k) = & -1,270 + (-1,781 - 0,349 + 2) \cdot Y_{\text{КРМ-2}}(t_{k-1}) - (1 - 0,349) \cdot Y_{\text{КРМ-2}}(t_{k-2}) + \\
 & + 0,108 \cdot X_1(t_k) + 1,216 \cdot X_2(t_k) - 0,176 \cdot X_4(t_k) + 2,567 \cdot X_6(t_k) + 0,389 \cdot X_7(t_k) + \\
 & + 0,361 \cdot X_8(t_k) + 0,009 \cdot X_9(t_k) + 0,166 \cdot X_{10}(t_k) = -1,270 - 0,130 \cdot Y_{\text{КРМ-2}}(t_{k-1}) + \\
 & + 0,651 \cdot Y_{\text{КРМ-2}}(t_{k-2}) + 0,108 \cdot X_1(t_k) + 1,216 \cdot X_2(t_k) - 0,176 \cdot X_4(t_k) + 2,567 \cdot X_6(t_k) + \\
 & + 0,389 \cdot X_7(t_k) + 0,361 \cdot X_8(t_k) + 0,009 \cdot X_9(t_k) + 0,166 \cdot X_{10}(t_k)
 \end{aligned} \tag{5}$$

КРМ-2 вида (5) имеет показатели постпрогноза лучшие, чем у ЛММ и КРМ-1, на, соответственно, 30...80%, что иллюстрирует рисунок 3. Анализ и обоснование непротиворечивости знаков и значений коэффициентов при факторах приведены в работе.

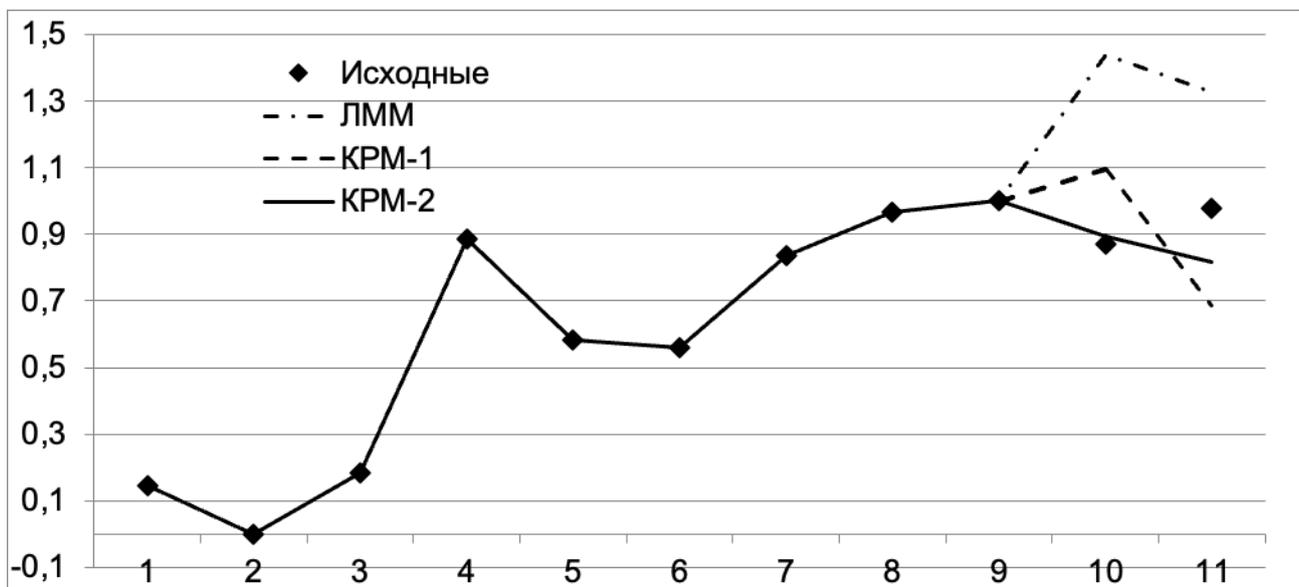


Рисунок 3 – Модели ЛММ, КРМ-1 и КРМ-2 ПРП Пермского края в посткризисный период $N=11$

ПРП региона в существенной степени определяется его природными богатствами и населением. Однако на его развитие оказывают воздействие не только внутренние, но и внешние силы. И поскольку математические модели управления такого рода организационными системами должны учитывать их динамику, это означает, что при значительном изменении внешней среды модель должна соответствующим образом корректироваться. Поэтому анализ полных статистических данных о частных критериях и факторах развития ПРП Пермского края за современный рыночный период развития экономики страны, встроенной в общемировую экономическую систему, требуют учитывать, что их изменение могло происходить не только планомерно, но и на фоне глобальных потрясений и незапланированных изменений общеэкономической ситуации в стране и мире. Поэтому имеющиеся полные статистические данные о частных критериях и факторах в количестве $N=18$ были разделены на два интервала – до глобального финансового кризиса ($N=8$) и после него ($N=11$), чтобы проанализировать адекватность изменения коэффициентов (табл. 1).

Как можно видеть в табл. 1, коэффициенты КРМ-2 изменяются корректно на разных временных интервалах, подстраиваясь и под изменяющуюся экономическую конъюнктуру, и соответствующую ей статистику. Вот несколько тому примеров.

В долгосрочной перспективе третьим по значимости для ПРП ПК является фактор «Посевные площади сельскохозяйственных культур, тыс. га» (X_1), причем его влияние оценивается как отрицательное. В то же время, на коротких временных интервалах этот же фактор оказывает лишь седьмое по значимости влияние на ПРП. При этом фактор (X_1) в посткризисный период начинает оказывать слабое положительное влияние на ПРП, что объясняется переориентацией национальной стратегии на импортозамещение и дотационной краевой помощью сельхозпроизводителям в 2014 г.

Таблица 1 – Изменение коэффициентов КРМ-2 на различных временных интервалах

Параметр	КРМ-2 $N=18$		КРМ-2 $N=8$		КРМ-2 $N=11$	
	Значение	Ранг модуля	Значение	Ранг модуля	Значение	Ранг модуля
a	-0,517		-0,908		-1,270	
b	-1,995		-2,145		-1,781	
c_1	-0,897	3	-0,169	7	0,108	7
c_2	1,215	2	0,692	2	1,216	2
c_3					–	
c_4	-0,175	6	0,292	5	-0,176	5
c_5					–	
c_6	2,215	1	2,464	1	2,567	1
c_7	0,482	4	0,621	3	0,389	3
c_8	0,105	7	0,087	8	0,361	4
c_9	-0,270	5	-0,353	4	0,009	8
c_{10}	0,103	8	0,174	6	0,166	6
d	-0,209		-0,834		-0,349	

В целом за 18-тилетний период пятым по значимости является фактор «Цена нефти Brent (среднегодовое значение), USD за баррель» (X_9). При этом наиболее существенное влияние данного фактора в общей динамике уровня ПРП приходится на докризисный период – период высоких цен на углеводороды и высокой доли их экспорта в структуре экономики страны в целом и Пермского края в частности. В этот период данный фактор был даже четвертым по значимости влияния на ПРП ПК. После принятия в 2009 г. федерального закона об энергосбережении и повышении энергетической эффективности, а также начала с 2014 г. реализации программы импортозамещения и снижения мировых цен на энергоносители значимость фактора (X_9) существенно снизилась, так что с 2008 г. он оказывает уже последнее по значимости влияние на ПРП.

Это дает основание констатировать, что полученная КРМ-2 адекватно учитывает также и изменения под воздействием внешней среды, а потому может быть использована для управления ПРП региона.

Руководствуясь задачей сформулировать рекомендации по управлению ПРП региона, следует, прежде всего, понимать, что факторы, определяющие ПРП, в соответствии с их экономической природой следует подразделять на управляемые и неуправляемые. Лицо, принимающее решение (ЛПР) в рамках наделенных полномочий по управлению регионом, оценивает свои возможности с позиции компенсации негативных воздействий неуправляемых факторов на ПРП за счет разработки подходящего набора изменений управляемых факторов. Для обеспечения расчета оперативных модельных значений ПРП была исследована применимость разных методов прогнозирования факторов на период, следующий за исходными данными. Показано, что достаточно обоснова-

но применение для них линейной аппроксимации по последним 3-5 временным периодам, при этом коэффициент детерминации $R^2 \approx 0,9$ почти во всех случаях.

Как уже показано в табл. 1, наиболее значимым управляемым фактором ПРП ПК является «Стоимость основных фондов на конец года, млн. руб.» (X_6). В качестве второго по значимости установлен управляемый фактор «Посевные площади сельскохозяйственных культур, тыс. га» (X_1). Первый отражает производственный потенциал региона, второй – основа обеспечения продовольственной безопасности, и оба – важные компоненты импортозамещения. Так, прогнозируя динамику ПРП ПК путем изменения управляемых факторов на $\pm 5\%$, получили наибольшее улучшение прогноза развития ПРП на 12-13% в результате увеличения обоих факторов на 5% (см. рис. 4).

Наиболее значимыми неуправляемыми факторами установлены «Среднегодовая численность занятых в экономике» (X_2), а также «Цена нефти» (X_9), имеющая большое экономическое значение, трудно предсказуемая и, следовательно, порождающая существенные риски. Прогнозируя динамику ПРП ПК путем изменения неуправляемых факторов на $\pm 5\%$, получили наибольшее снижение ПРП на 0,6-1,3% при снижении обоих факторов на 5% (см. рис. 4).

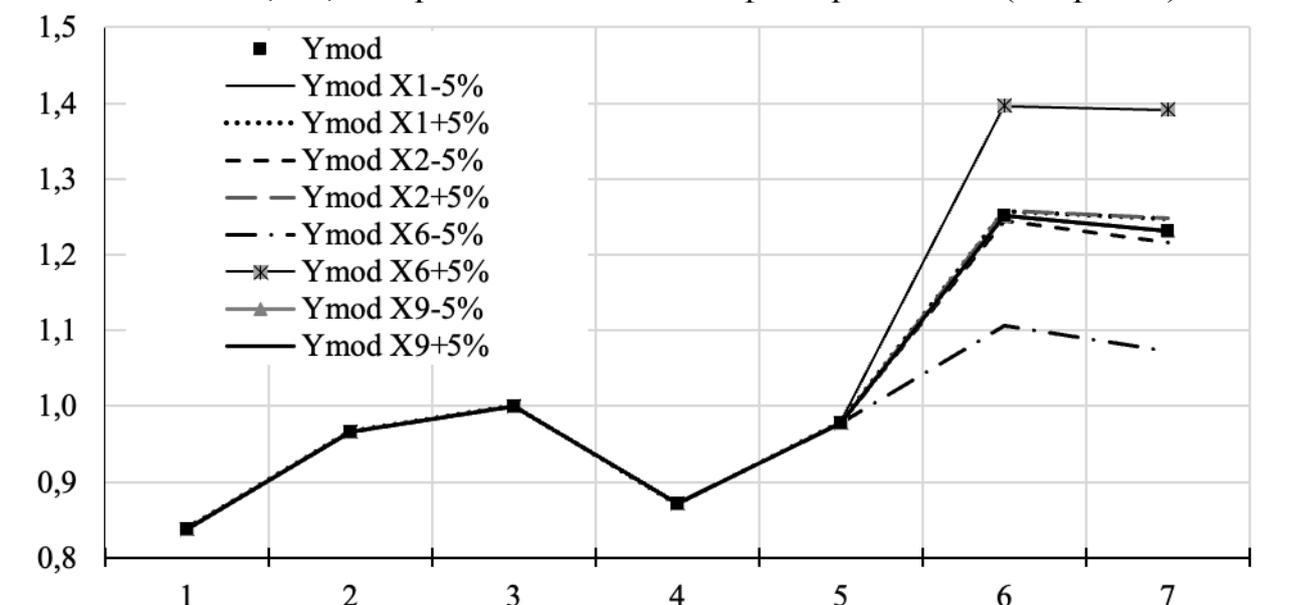


Рисунок 4– Исследование чувствительности КРМ-2 к малому изменению факторов

Это означает, что 5% положительная динамика управляемых факторов с запасом компенсирует негативную 5% динамику неуправляемых факторов. В результате совместного 5% положительного изменения управляемых и отрицательного изменения неуправляемых факторов происходит рост ПРП на 24,9% при прогнозировании на 1 год и на 32,9% при прогнозировании на 2 года. Расчет положительной динамики управляемых факторов, нивелирующей снижение цены нефти Brent X_9 на 5% показал, оно компенсируется ростом посевных площадей сельскохозяйственных культур X_1 на 1,00% и ростом стоимости основных производственных фондов на конец периода X_6 на 0,01% (рисунок 5).

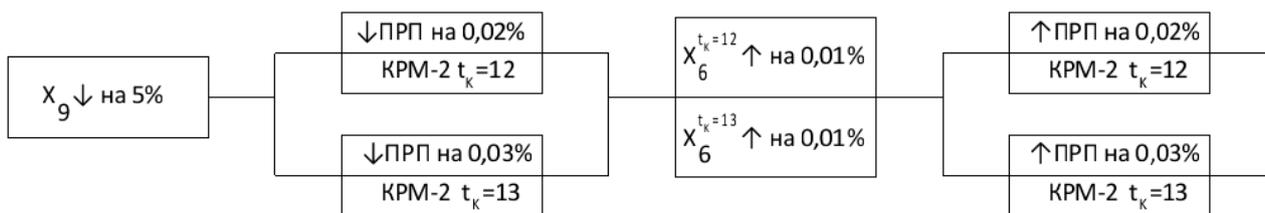


Рисунок 5 – Возможности воздействия ЛПР на негативные прогнозные области ПРП в %-ом выражении

Таким образом, результаты выполненного исследования показывают возможность использования КРМ-2 ПРП региона для поддержки принятия решений по управлению им, приводящая не только к компенсации негативных воздействий неуправляемых факторов, но и к последующему росту ПРП в течение 1-2 лет на 11,2%–11,8%. Разработанные модели демонстрируют возможность компенсационно устранять (упреждать) последствия негативного влияния неуправляемых факторов путем разработки планомерного количественно определенного воздействия на управляемые факторы, системообразующие ПРП региона.

III. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертационная работа посвящена повышению эффективности управления ПРП Пермского края за счет возможности компенсационно устранять последствия негативного влияния неуправляемых факторов, путем разработки планомерного количественно определенного воздействия на управляемые факторы.

В рамках проведенного исследования были получены следующие основные результаты:

1. Проведен анализ существующих методов и моделей оценки крупномасштабных организационных систем показывающий, что в 28,8% случаев традиционно используемые ЛММ имеют недопустимо высокую погрешность прогноза и не должны использоваться для прогноза последствий управленческих решений.
2. Проверена возможность применения метода наибольшей гладкости для построения комплексных критериев оценки крупномасштабных организационных систем на примере ПРП нескольких регионов РФ. Показано улучшение на 14,6% целевой функции, используемой при подборе рангов частных критериев в задаче построения комплексного критерия.
3. Обоснованно выбраны частные критерии и разработана комплексная оценка ПРП ПК, исключая человеческий фактор в ранжировании частных критериев и обладающая негладкостью 12,3%.
4. Проверен метод регрессионно-дифференциального моделирования крупномасштабных организационных систем на примере ПРП ПК и его компонентов. На основе анализа его недостатков, вносящих человеческий фактор исследователя в результаты моделирования, и в развитие РДМ предложен метод конечно-разностного моделирования крупномасштабных организационных си-

стем, в 75,9% случаев дающий лучшие постпрогнозы, чем традиционно используемый ЛММ.

5. Построена КРМ-2 ПРП ПК, имеющая погрешность аппроксимации 0,39% и погрешность постпрогноза на первый год 2,7%, на второй год 16,3%. Оценены коэффициенты при факторах и показана их адекватность, в том числе, при существенных изменениях условий деятельности крупномасштабных организационных систем.

6. Сформированы рекомендации по управлению использованием регионального ПРП на основе прогнозирования его развития, позволяющие за счет 5% улучшения управляемых факторов не только компенсировать 5% ухудшение неуправляемых факторов, но и обеспечить рост ПРП на 11,2%–11,8% в два прогнозируемых года.

IV. СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в рецензируемых научных изданиях, в которых должны быть опубликованы основные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук

1. Затонский, А. В. Прогнозирование экономических систем по модели на основе регрессионного дифференциального уравнения / А. В. Затонский, **Н. А. Сиротина**. – текст : непосредственный // Экономика и математические методы. – 2014. – Т. 50. – №1. – С. 91–99.
2. **Сиротина, Н. А.** Краткосрочное управление природно-ресурсным потенциалом Пермского края с использованием конечно-разностных моделей / Н. А. Сиротина. – текст : непосредственный // Современная наука: актуальные проблемы теории и практики. Серия: Естественные и технические науки. – 2021. – №11. – С. 94–101.
3. Копотева, А. В. Модели машинного обучения в задаче прогнозирования природно-ресурсного потенциала Пермского края / А. В. Копотева, А. А. Максимов, **Н. А. Сиротина**. – текст : непосредственный // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника. – 2021. – Т. 21. – № 4. – С. 126–136.
4. **Сиротина, Н. А.** Метод конечно-разностного социально-экономического прогнозирования / Н. А. Сиротина, А. В. Копотева, А. В. Затонский. – текст : непосредственный // Прикладная математика и вопросы управления / Applied Mathematics and Control Sciences. – 2021. – № 1. – С. 174–189.
5. **Сиротина, Н. А.** Применение конечно-разностных моделей для краткосрочного прогнозирования природно-ресурсного потенциала Пермского края / Н. А. Сиротина, А. В. Копотева, А. В. Затонский. – текст : непосредственный // Вестник Южно-уральского государственного универси-

- тата. Серия: компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника. – 2021. – Т. 21. – № 2. – С. 154–166.
6. Затонский, А. В. Управление природно-ресурсным потенциалом Пермского края на основе конечно-разностной модели второго порядка / А. В. Затонский, **Н. А. Сиротина**. – текст : непосредственный // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника. – 2022. – Т. 22. – № 2. – С. 96–106.

Публикации в изданиях, индексируемых в международных реферативных базах и системах цитирования

7. **Сиротина, Н. А.** Оценка вклада горнодобывающей отрасли в природно-ресурсный потенциал региона / Н. А. Сиротина, А. В. Копотева, А. В. Затонский. – текст : непосредственный // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2020. – № 8. – С. 163–178.
8. Finite-differential models used as a basis for IT support in problem-solving = Конечно-разностные модели как основа для ИТ поддержки решения задач / A. Zatonkiy, N. **Sirotna**, R. Bazhenov, I. Altukhova, E. Alutina. – Текст : электронный. – DOI: 10.1088/1757-899X/1047/1/012040 // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2021. – Vol. 1047. – Article no. 12040. – Ст. на англ. языке.

Свидетельства о регистрации программ для ЭВМ

9. Свидетельство ОФЭРНИО о государственной регистрации программы для ЭВМ № 19062 Программа идентификации многофакторных систем на основе разреженных данных / **Сиротина Н.А.**, Затонский А.В; опубл. 04.04.2013.

Публикации в прочих изданиях

10. **Сиротина, Н. А.** Преимущества регрессионных дифференциальных моделей для прогнозирования экономического развития / Н. А. Сиротина. – Текст : непосредственный // Прикладная информатика. – 2013. – № 2(44). – С. 006–018.
11. **Сиротина, Н. А.** Природно-ресурсный потенциал в экономической системе региона (на примере Пермского края) / Н. А. Сиротина. – Текст : непосредственный // Общество на рубеже эпох: взгляд на современность через призму социальных и гуманитарных наук : мат. всерос. с междунар. уч. заоч. науч.-практ. конф. – Пермь. – 2013. – С. 184–187.
12. **Сиротина, Н. А.** Преимущества регрессионно-дифференциального моделирования на примере модели развития лесного комплекса Пермского края / Н. А. Сиротина. – текст : непосредственный // Системы

- управления и информационные технологии. – 2014. – № 3-1(57). – С. 175–178.
13. **Сиротина, Н. А.** Регрессионно-дифференциальные модели и конечно-разностные модели: две стороны одного подхода / Н. А. Сиротина. – текст : непосредственный // Решение: мат. IX Всерос. науч.-практ. конф. / Березник. филиал Перм. нац. исслед. политехн. ун-та. – Березники. – 2020. – Т. 1. – С. 287–289.
 14. **Сиротина, Н. А.** Нефтегазовая отрасль Пермского края: состояние и перспективы / Н. А. Сиротина. – текст : непосредственный // Всероссийская (Национальная) научно-практическая конференция «Актуальные проблемы экономики современной России» Институт экономики, управления и финансов Марийский государственный университет. Йошкар-Ола. – 2020. – С. 332–336.
 15. **Сиротина, Н. А.** Конечно-разностное моделирование в управлении природно-ресурсным потенциалом Пермского края / Н. А. Сиротина. – текст : непосредственный // Автоматизированные системы управления и информационные технологии: мат. всерос. науч.-практ. конф. : в 2 т. Пермь. – 2021. – С. 295–299.
 16. **Сиротина, Н. А.** Компенсация неуправляемых факторов динамики природно-ресурсного потенциала Пермского края / Н. А. Сиротина. – Текст : непосредственный // Решение: мат. XI Всерос. науч.-практ. конф. / Березник. филиал Перм. нац. исслед. политехн. ун-та. – Березники. – 2022. –Т. 1. – С. 344-346.