

На правах рукописи



ПОНОСОВ АЛЕКСАНДР АНДРЕЕВИЧ

**РАЗВИТИЕ СИСТЕМЫ ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ В
РЕГИОНАЛЬНОЙ ЭКОНОМИКЕ НА ОСНОВЕ НЕПРЕРЫВНО-
ДИСКРЕТНЫХ ЭКОНОМИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ**

08.00.13 – Математические и инструментальные методы экономики

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата экономических наук

Пермь 2015

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Пермский государственный национальный исследовательский университет»

Научный руководитель: **Максимов Владимир Петрович**
доктор физико-математических наук, профессор

Официальные
оппоненты: **Ермолаев Михаил Борисович**,
доктор экономических наук,
кандидат физико-математических наук, профессор,
профессор кафедры «Экономика и финансы»,
ФГБОУ ВПО «Ивановский государственный химико-
технологический университет», г. Иваново

Дедов Леонид Анатольевич,
доктор экономических наук, профессор,
профессор кафедры «Экономика и менеджмент»,
Глазовский инженерно-экономический институт
(филиал) ФГБОУ ВПО «Ижевский государственный
технический университет им. М.Т. Калашникова»,
г. Глазов

Ведущая организация: ФГАОУ ВО «Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского» (Национальный исследовательский университет), г. Нижний Новгород

Защита диссертации состоится «26» января 2016 г. в 13 часов 30 мин. на заседании диссертационного совета ДМ 212.188.09 на базе Пермского национального исследовательского политехнического университета и Пермского государственного национального исследовательского университета по адресу: 614990, г. Пермь, Комсомольский пр., д. 29, ауд. 423б.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеках и на сайтах Пермского национального исследовательского политехнического университета (<http://www.pstu.ru>) и Пермского государственного национального исследовательского университета (<http://www.psu.ru>).

Автореферат разослан: «30» ноября 2015 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
кандидат экономических наук, доцент



Жуланов Е.Е.

I. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Сегодня правительственные институты субъектов Российской Федерации все чаще сталкиваются с проблемой сбалансированного развития региона. Кризисные ситуации в стране требуют оперативных и взвешенных управляющих решений.

Процесс управления складывается из решения совокупности задач, в числе которых оценка влияния на регион большого числа внешних и внутренних факторов. Целостное и объективное решение сложных экономических проблем становится возможно лишь с использованием систем поддержки принятия решений (СППР), которые позволяют учитывать множество экономических факторов и их взаимное влияние, проводить сценарное прогнозирование в парадигме «что будет, если», а также решать задачи целевого управления в парадигме «что необходимо для».

В большинстве случаев СППР представляет собой программный комплекс, в основе которого лежит экономико-математическая модель как система математических соотношений — уравнений и неравенств. При этом сегодня нет СППР, которые учитывали бы различные типы динамики переменных в рамках одной модели. Примерами показателей с разнородной динамикой являются, в частности, экологические характеристики, меняющиеся в непрерывном времени, и переменные, описывающие динамику инвестиций и выдачу кредитов в дискретном времени. Для решения этой проблемы необходимо в основу существующих СППР положить возможность использования экономико-математических моделей с непрерывным и дискретным временем. Трудоемкость и скрытые проблемы формирования модели региона в новом классе непрерывно-дискретных моделей требует разработки нового инструментария.

Формализация экономических процессов в регионе с использованием нового класса динамических моделей позволяет более адекватно описывать реальное поведение системы, и как следствие, вырабатывать более обоснованные и результативные решения по управлению региональной экономической системой. Все вышеизложенное обуславливает актуальность темы диссертации, посвященной развитию системы поддержки принятия решений в региональной экономической системе на основе непрерывно-дискретных экономико-математических моделей.

Степень научной разработанности проблемы исследования. Исследования в области экономико-математического моделирования, как основы разработки СППР, занимают заметное место в современной научной литературе.

Исследованию и моделированию региональных экономических систем посвящены работы Андрианова Д.Л., Ермолаева М.Б. Викулова В.Е., Гурмана В.И., Дедова Л.А., Золотова Т.В., Литовка О.П., Миролюбовой А.А., Павлова К.В., Федорова М.М., Batabyal A.A., Greiner R., Nijkamp P.

Вопросы моделирования экономических систем с учетом экологических факторов изучались в работах Анциферова И.В., Баркалова Н.Б., Вайсман Я.И., Васенова А.В., Дружинина П.В., Дэмбэрэла С., Литовка О.П., Мазалова В.В., Оленева Н.Н., Павлова К.В., Поспелова И.Г., Пыткина А.Н., Реттиева А.Н., Шебеко Ю.А., Agee M.D., Batabyal A.A., Beladi H., Crocker T.D., Hartl R.F., Haunschmied J., Herbert R.D., Kort P.M., Leeves G.D., Nahorski Z., Ravn H.F.

Результаты исследования различных классов экономико-математических моделей представлены в работах Власовой М.Н., Калиткина Н.Н., Карпенко Н.В., Кузнецова Ю.А., Максимова В.П., Михайлова А.П., Семенова А.В., Симонова П.М., Тишкина В.Ф., Bouman M., Forrester J.W., Heijungs R., Huppes G., Ichikawa A., Sterner T., Van den Bergh J., Van der Voet E.

Исследования в области непрерывно-дискретных моделей ведутся относительно недавно. Дополнительную информацию об этом классе моделей можно найти в работах Бортакковского А.С., Валуева А.М., Дыхты В.А., Зачкевич З., Козлова Р.И., Козловой О.Р., Кочкиной Н.А., Максимова В.П., Марченко В.А., Минюк С.А., Поповой Е.А., Чадова А.Л., Agranovich G., De la Sen M., Gallego A., Garavello M., Soto J.C., Malaina J.L. При этом авторы основное внимание уделяют различным аспектам математической теории, без раскрытия прикладных аспектов данного класса задач применительно к экономике.

Следует также отметить работы, посвященные преобразованию одного класса моделей к другому, так, например, в работах Драницы Ю.П., Драницы А.Ю., Алексеевской О.В. можно найти описание подходов к дискретизации непрерывных уравнений, но как таковые «гибридные» системы в этих работах не рассматриваются.

Детальное описание задач целевого управления для экономико-математических моделей можно найти в работах Валуева А.М., Еремченко С.М., Лемперта А.А., Поносова Д.А., Урбановича Д.Е., Borrelli F., Bortakovskii A.S., Boyd J.E., Clarke F.H., Dmitruk A.V., Kaganovich A.M., Swarder D.D., Vinter R.B.

Ряд исследователей посвятили свои работы описанию методов и алгоритмов автоматизации построения математических моделей с использованием специализированного программного обеспечения, которые могут применяться при разработке систем поддержки принятия решений. Среди таких публикаций выделим работы Угольницкого Г.А., Усова А.Б., Чадова А.Л., Branicky M. S., Borkar V. S., Mitter S. K. как наиболее близкие к теме диссертации.

Таким образом, исследований в данной области довольно много, но ни в одной из упомянутых работ нет описания методов и алгоритмов, реализованных в системах поддержки принятия решений, способных в программном режиме ставить и решать задачи целевого управления для региональных непрерывно-дискретных экономических моделей с учетом экологических факторов.

Объект исследования – региональные экономические системы.

Предметом исследования выступают социально-экономические процессы и явления, протекающие в региональных экономических системах.

Основная гипотеза. Развитие региональной экономической системы может быть описано с помощью экономико-математической модели в форме системы уравнений, связывающих основные показатели и управляющие переменные, дополненной ограничениями на переменные в форме равенств и неравенств.

Цель и задачи исследования. Целью диссертации является повышение точности моделирования и управления экономикой региона, на основе развития системы поддержки принятия решений в региональной экономической системе с использованием непрерывно-дискретных экономико-математических моделей.

Реализация поставленной цели обусловила необходимость решения следующих задач:

1. Предложить и обосновать метод расчета параметров сбалансированного развития региональной экономической системы с учетом целевых установок и разнородной динамики протекающих в ней процессов на основе постановки и решения задачи целевого управления для непрерывно-дискретной динамической модели.

2. Построить непрерывно-дискретную динамическую модель региональной экономической системы, описывающую ее основные социально-экономические процессы.

3. Разработать методологию компьютерного эксперимента в исследовании задач целевого управления регионом на основе непрерывно-дискретных экономико-математических моделей.

4. Создать комплекс программ, развивающий систему поддержки принятия решений в части использования нового класса динамических моделей для решения задач целевого управления региональной экономической системой.

Область исследования соответствует паспорту научной специальности ВАК 08.00.13 «Математические и инструментальные методы экономики» по следующим пунктам: п.1.1. «Разработка и развитие математического аппарата анализа экономических систем: математической экономики, эконометрики, прикладной статистики, теории игр, оптимизации, теории принятия решений, дискретной математики и других методов, используемых в экономико-математическом моделировании»; п.1.2. «Теория и методология экономико-математического моделирования, исследование его возможностей и диапазонов применения: теоретические и методологические вопросы отображения социально-экономических процессов и систем в виде математических, информационных и компьютерных моделей»; п.2.1. «Развитие теории, методологии и практики компьютерного эксперимента в социально-экономических исследованиях и задачах управления»; п.2.3. «Разработка систем поддержки принятия решений для

рационализации организационных структур и оптимизации управления экономикой на всех уровнях».

Теоретическую и методологическую основу исследования составляют труды отечественных и зарубежных учёных в области теории и методологии непрерывно-дискретного моделирования, экономико-математического моделирования и автоматизированных аналитических систем. При проведении исследования использованы методы системного анализа, экономико-математического моделирования, в том числе эконометрические методы, методы теории функционально-дифференциальных систем, численные методы, средства разработки и интеграции программных продуктов.

Информационной основой исследования служат официальные данные территориального органа Федеральной службы государственной статистики по Пермскому краю и Министерства экономического развития РФ, а также ряда других официальных источников.

Научная новизна диссертационной работы заключается в следующем.

1. Предложен и обоснован метод расчета параметров сбалансированного развития региональной экономической системы на основе решения задачи оптимального управления для непрерывно-дискретной динамической модели экономики региона с учетом экологических факторов. Данный метод охватывает более широкий по сравнению с известными класс математических моделей и развивает методы оптимального управления экономическими системами. Он повышает обоснованность управленческих решений в политике развития региона за счет дополнительного учета экологических факторов и типа динамики процессов, протекающих в экономической системе. Возможность программной реализации нового метода обеспечивается разработанным алгоритмом редукции непрерывно-дискретной модели к системе разностных уравнений, что позволяет эффективно исследовать задачу управления на основе вычислительного эксперимента (п.1.1. *«Разработка и развитие математического аппарата анализа экономических систем: математической экономики, эконометрики, прикладной статистики, теории игр, оптимизации, теории принятия решений, дискретной математики и других методов, используемых в экономико-математическом моделировании»* паспорта специальности 08.00.13 ВАК РФ, главы 1 и 3, разделы 1.2, 1.3 и 3.2.1, стр. 19-33, 56-57).

2. Дано математическое описание основных социально-экономических процессов региона в виде непрерывно-дискретной динамической модели, охватывающей, в отличие от традиционно используемых моделей с дискретным временем, как непрерывные процессы, например, самоочищение окружающей среды и непрерывное производство, так и дискретные процессы, в том числе процессы инвестирования и кредитования (п.1.2. *«Теория и методология экономико-математического моделирования, исследование его возможностей и диапазонов*

применения: теоретические и методологические вопросы отображения социально-экономических процессов и систем в виде математических, информационных и компьютерных моделей» паспорта специальности 08.00.13 ВАК РФ, глава 3, раздел 3.2.3, стр. 57-77).

3. Разработана и апробирована методология компьютерного эксперимента в исследовании задач целевого управления регионом на основе непрерывно-дискретной экономико-математической модели. Методология охватывает новый класс динамических моделей, содержащих переменные как непрерывного, так и дискретного аргумента и учитывающих эффекты последействия. На основе разработанной методологии проведен компьютерный эксперимент по исследованию задачи целевого управления для непрерывно-дискретной экономико-математической модели Пермского края с учетом экологических факторов (п.2.1. *«Развитие теории, методологии и практики компьютерного эксперимента в социально-экономических исследованиях и задачах управления»* паспорта специальности 08.00.13 ВАК РФ, глава 3, разделы 3.2.4, 3.2.5 и 3.3, стр. 77-90).

4. Создан программный комплекс, развивающий систему поддержки принятия решений в части использования нового класса динамических моделей для решения задач целевого управления региональной экономической системой. Преимуществом доработанной СППР является возможность решения задач целевого управления для непрерывно-дискретных экономических моделей, а также динамическая коррекция противоречивых моделей в программном режиме (п.2.3. *«Разработка систем поддержки принятия решений для рационализации организационных структур и оптимизации управления экономикой на всех уровнях»* паспорта специальности 08.00.13 ВАК РФ, главы 2 и 4, разделы 2.5 и 4.2, стр. 49-51, 96-113).

Теоретическая значимость исследования заключается в разработке концептуального подхода к решению задач целевого управления для нового класса динамических моделей экономических систем, методологии и алгоритмов компьютерного эксперимента, направленных на развитие инструментальных систем поддержки принятия решений по эффективному управлению экономической системой.

Практическая значимость исследования определяется тем, что теоретические положения, разработанные в диссертации, реализованы в виде инструментальных средств в среде моделирования Prognoz Platform¹.

Созданное инструментальное средство используется в коммерческих проектах компании ЗАО «ПРОГНОЗ» и направлено на решение задач целевого управления для непрерывно-дискретных экономических и эколого-экономических моделей развития регионов.

¹ Подробнее: www.prognoz.com

Результаты теоретико-методологических исследований автора используются при чтении лекций, проведении практических занятий и лабораторных работ по дисциплинам «Методы оптимальных решений», «Эконометрика» и «Современные информационные системы в управлении организацией» в ФГБОУ ВПО «Пермский государственный национальный исследовательский университет».

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект №10-01-96054) и Министерства образования и науки Российской Федерации в рамках Постановления Правительства РФ от 9.04.2010 г. № 218 (государственный контракт №02.G25.31.0039).

Степень достоверности и апробация работы. Достоверность и обоснованность выводов подтверждается корректным теоретическим обоснованием приведенных утверждений. Все результаты подтверждены исследованиями, проведенными с использованием реальных статистических данных развития региона.

Основные положения и результаты работы были представлены в виде докладов и получили положительную оценку на конференции «Экономика и управление: актуальные проблемы и поиск путей решения» (г. Пермь, апрель 2011 г.), на VI всероссийской научной конференции «Математическое моделирование развивающейся экономики, экологии и биотехнологий (ЭКОМОД-2011)» (г. Киров, июнь - июль 2011 г.), на международной конференции Колмогоровские чтения - V «Общие проблемы управления и их приложения (ОПУ-2011)» (г. Тамбов, октябрь 2011 г.), на конференции «Экономика и управление: актуальные проблемы и поиск путей решения» (г. Пермь, апрель 2012 г.), на всероссийской научной конференции с международным участием «Математическая теория управления и математическое моделирование» (г. Ижевск, май 2012 г.), на II-я Международной научной конференции «Актуальные проблемы экономики и управления (МК-2013-023)» (г. Москва, апрель 2013 г.), на международной конференции Колмогоровские чтения - VI «Общие проблемы управления и их приложения (ОПУ-2013)» (г. Тамбов, октябрь 2013 г.), на «IX Международном научном конгрессе 2014» (г. Москва, апрель 2014 г.), на VIII всероссийской научной конференции с международным участием «Математическое моделирование развивающейся экономики, экологии и технологий (ЭКОМОД-2014)» (г. Москва, октябрь 2014 г.), на открытом городском семинаре «Perm Workshop on Applied Economic Modeling» (г. Пермь, февраль 2015 г.), на семинарах Лаборатории конструктивных методов исследования динамических моделей, ПГНИУ (г. Пермь, 2012-2015 гг.).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 12 научных работ, общим объемом 4,12 п.л., из них 5 работ (2,45 п.л.), отражающие основные результаты диссертационной работы, опубликованы в изданиях, входящих в список, определенный ВАК Министерства образования и науки РФ. Также по теме диссертационной работы зарегистрировано 3 программных кода для ЭВМ.

Из результатов совместных работ в диссертацию включены только результаты, принадлежащие автору лично.

Структура диссертации. Диссертационная работа изложена на 129 страницах основного текста, состоит из введения, четырех глав, заключения и приложений, иллюстрирована 8 таблицами и 13 рисунками. Библиографический список содержит 121 наименование литературных источников, в том числе 85 отечественных и 36 зарубежных.

Во введении обоснована актуальность исследования, сформулирована научная новизна, приведены цель и задачи исследования, перечислены наиболее существенные результаты, дана общая характеристика работы.

В первой главе «Модуль исследования задач управления для непрерывно-дискретных экономико-математических моделей как составная часть систем поддержки принятия решений» ставится задача целевого управления для непрерывно-дискретной экономико-математической модели; дается описание схемы приведения исходной модели к задаче, основанной на использовании разностных уравнений с дискретным временем.

Во второй главе «Обобщение методов и алгоритмов исследования дискретных моделей, на случай непрерывно-дискретных систем» представлены вспомогательные алгоритмы и методы, которые легли в основу разработанного программного комплекса, в том числе, формируется алгоритм исследования задачи на разрешимость и описываются применяемые методы возможной динамической коррекции.

В третьей главе «Исследование задачи оптимального управления региональной экономической системой на основе непрерывно-дискретной экономико-математической модели» рассматривается задача оптимального управления для непрерывно-дискретной модели развития Пермского края, с применением разработанных алгоритмов.

В четвертой главе «Программная реализация алгоритмов исследования непрерывно-дискретных моделей» описана архитектура разработанного программного обеспечения, дается описание существенных деталей программной реализации.

В заключении приведены основные выводы и результаты работы, оценено их практическое значение и даны рекомендации по дальнейшему развитию разработанных в диссертации методик и моделей.

В приложении представлены листинг основного программного кода, свидетельства о регистрации программных кодов для электронных вычислительных машин, разработанных на языке системы компьютерной алгебры Maple и в среде моделирования Prognos Platform, а также справки о внедрении результатов диссертационной работы.

II. ОСНОВНЫЕ НАУЧНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ И РЕЗУЛЬТАТЫ, ВЫНОСИМЫЕ НА ЗАЩИТУ

1. Предложен и обоснован метод расчета параметров сбалансированного развития региональной экономической системы на основе решения задачи оптимального управления для непрерывно-дискретной динамической модели экономики региона с учетом экологических факторов. Данный метод охватывает более широкий по сравнению с известными класс математических моделей и развивает методы оптимального управления экономическими системами. Он повышает обоснованность управленческих решений в политике развития региона за счет дополнительного учета экологических факторов и типа динамики процессов, протекающих в экономической системе. Возможность программной реализации нового метода обеспечивается разработанным алгоритмом редукции непрерывно-дискретной модели к системе разностных уравнений, что позволяет эффективно исследовать задачу управления на основе вычислительного.

В работе определена и обоснована необходимость учета экологических факторов при принятии управленческих решений в политике развития региона. Повышение обоснованности данных решений достигается благодаря использованию более адекватной модели, которая относится к концепции умеренного развития экономики региона. Модель предполагает минимизацию загрязнения окружающей среды, при условии, что показатели экономического развития региона будут лежать в заданном диапазоне изменения.

Включение в модель региона экологических факторов трудоемко, поскольку задачи экономического развития и экологического благополучия часто плохо сопоставимы. Это требует применения новых методических подходов с привлечением современных математических методов.

В рамках работы рассматривается новый класс моделей, который позволяет учитывать, как непрерывные процессы самоочищения окружающей среды, так и дискретные экономические процессы, например, инвестирование и кредитование, в одной системе математических выражений. За счет учета реальной динамики каждого процесса, стратегия развития региона на основе данной модели становится более обоснованной и объективной.

Таким образом, в диссертационной работе рассматриваются задачи управления для непрерывно-дискретных региональных экономических систем, получаемых в результате моделирования динамики показателей экономических субъектов. Другими словами, система содержит две подсистемы: с непрерывным временем и с дискретным временем. Для подсистемы с непрерывным временем $0 \leq t \leq T$ — множество моментов времени, в которые наблюдаются показатели экономической системы и в

которые возможно осуществление управления. T — период управления моделью; для подсистемы с дискретным временем фиксируется набор дискретных моментов времени: $\{t_1, t_2, \dots, t_\mu\}$, $0 = t_0 < t_1 < \dots < t_\mu = T$.

Переменные в модели имеют следующий смысл:

- $x: [0, T] \rightarrow R^n$ — вектор-функция фазовых переменных, характеризующих состояние экономической системы в непрерывном времени;
- $y(t_i) \in R^v, i = 1, 2, \dots, \mu$, — вектор фазовых переменных, зависящих от дискретного времени, в момент t_i ;
- $v_i \in R^m, i = 1, 2, \dots, \mu$, — векторное значение кусочно-постоянного управления, входящего в подсистему с непрерывным временем;
- $u(t_i) \in R^r, i = 1, 2, \dots, \mu$, — вектор управляющих переменных, входящих в подсистему с дискретным временем.

Здесь и далее, для краткости, будем использовать понятия: «непрерывная подсистема» и «дискретная подсистема». Данная терминология будет обозначать:

- «непрерывная подсистема» — одно или несколько уравнений системы, которые описывают поведение фазовых переменных, зависящих от непрерывного времени;
- «дискретная подсистема» — одно или несколько уравнений системы, которые описывают поведение фазовых переменных, зависящих от дискретного времени.

Взаимное влияние непрерывной и дискретной подсистемы, а также влияние управляющих переменных на состояние системы в целом описывается уравнениями:

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + \sum_{j:t_j < t} B_j(t)y(t_j) + \sum_{j:t_j \leq t} V_j(t)v_j + f(t), \quad t \in [0, T], \quad (1)$$

$$y(t_i) = \sum_{j:t_j < t_i} F_j x(t_j) + \sum_{j:t_j < t_i} D_j y(t_j) + \sum_{j:t_j \leq t_i} G_j u(t_j) + g(t_i), \quad i = 1, \dots, \mu, \quad (2)$$

где (1) - подсистема с непрерывным временем, а (2) - подсистема с дискретным временем $0 = t_0 < t_1 < \dots < t_\mu = T$. Здесь $A, B_j(t), V_j(t), F_j, D_j, G_j$ — матрицы соответствующих размерностей, причем A, F_j, D_j, G_j — постоянные, матрицы $B_j(t)$ и $V_j(t)$ — с суммируемыми элементами. Подсистемы (1)–(2) связаны между собой по состояниям, управление входит как в дискретную подсистему, определяя поведение ее траекторий в зависимости от сечений $x(t_j)$ траекторий непрерывной подсистемы, так и оказывает воздействие непосредственно в (1), помимо косвенного влияния через компоненты $y(t_j)$.

Модель динамики показателей экономической системы включает следующие составляющие:

1. систему уравнений динамики (1)-(2);
2. начальные значения показателей

$$\begin{aligned} x(0) &= x_0 \in R^n, \\ y(0) &= y_0 \in R^v; \end{aligned} \quad (3)$$

3. линейные ограничения-равенства на значения фазовых и управляющих переменных

$$\Lambda_1(x, y, v, u) = \gamma_1 \in R^{N_1}; \quad (4)$$

4. линейные ограничения-неравенства на значения фазовых и управляющих переменных.

$$\Lambda_2(x, y, v, u) \leq \gamma_2 \in R^{N_2}. \quad (5)$$

(здесь в (4) и (5) Λ_1 и Λ_2 — вектор-функционалы, определенные на соответствующих пространствах).

Для задачи (1)–(5) дополнительно задается критерий оптимизации, согласно которому из всего множества допустимых управлений выбирается оптимальное. В работе рассмотрены критерии, которые могут быть представлены с помощью линейного ограниченного функционала вида

$$Z(x, y, v, u) = \sum_{i=1}^{\mu} p_i x(t_i) + \sum_{i=1}^{\mu} q_i y(t_i) + \sum_{i=1}^{\mu} r_i u(t_i) + \sum_{i=1}^{\mu} s_i v_i, \quad (6)$$

где p_i, q_i, r_i, s_i — векторы соответствующих размерностей. Ставится задача оптимального управления: найти допустимое управление, удовлетворяющее ограничениям (3)–(5) и минимизирующее значение функционала Z на траекториях непрерывно-дискретной системы (1)-(2):

$$\begin{aligned} \min\{Z(x, y, v, u): \dot{x}(t) &= Ax(t) + \sum_{j:t_j < t} B_j(t)y(t_j) + \sum_{j:t_j \leq t} V_j(t)v_j + \\ &+ f(t), \quad t \in [0, T]; y(t_i) = \sum_{j:t_j < t_i} F_j x(t_j) + \sum_{j:t_j < t_i} D_j y(t_j) + \\ &\sum_{j:t_j \leq t_i} G_j u(t_j) + g(t_i), \quad i = 1, 2, \dots, \mu; x(0) = x_0 \in R^n; \\ &y(0) = y_0 \in R^v; \Lambda_1(x, y, v, u) = \gamma_1 \in R^{N_1}; \Lambda_2(x, y, v, u) \leq \gamma_2 \in R^{N_2}\}. \end{aligned} \quad (7)$$

Задача оптимального управления (7) имеет решение только в том случае, если множество допустимых управлений, определяемое системой (1)–(5), не пусто.

В работе проведен анализ двух возможных подходов к исследованию непрерывно-дискретной системы, основанных либо на редукции непрерывно-дискретной системы к системе дифференциальных уравнений с запаздывающим аргументом, либо на редукции непрерывно-дискретной системы к системе разностных уравнений (дискретизация

системы). На основе этого анализа сделаны обоснованные выводы о целесообразности редукции непрерывно-дискретной системы к системе разностных уравнений (дискретизация системы). Сформированная таким образом задача целевого управления оказывается удобной для исследования в силу конечномерности полученной задачи и возможности использования ранее реализованных методов и алгоритмов. В частности, используется метод динамической коррекции, который в случае неразрешимости исходной задачи позволяет найти такие ограничения, релаксация которых наиболее целесообразна с точки зрения получения новой задачи, минимально отличающейся от исходной и свободной от противоречивости.

В связи с этим, в рамках диссертационной работы в качестве основного метода исследования предлагаемого класса непрерывно-дискретных моделей используется метод сведения исходной системы к разностным уравнениям с дискретным временем.

Для этого используется следующий алгоритм, основными шагами которого являются:

- нахождение семейства траекторий фазовых переменных, зависящих от непрерывного времени (для этого на непрерывной подсистеме решается задача Коши);
- формирование уравнений для непрерывных фазовых переменных в узлах временной сетки, на которой определена дискретная подсистема;
- формирование приведенной системы уравнений с фазовыми переменными, зависящими только от дискретного времени.

2. Дано математическое описание основных социально-экономических процессов региона в виде непрерывно-дискретной динамической модели, охватывающей, в отличие от традиционно используемых моделей с дискретным временем, как непрерывные процессы, например, самоочищение окружающей среды и непрерывное производство, так и дискретные процессы, в том числе процессы инвестирования и кредитования.

В диссертационной работе рассматривается следующая экономическая проблема: в рамках доступных правительственным институтам Пермского края рычагов управления необходимо стимулировать развитие региона таким образом, чтобы в короткие сроки минимизировать прирост показателей, негативно влияющих на окружающую среду, таких как, объем выбросов загрязняющих веществ в атмосферу и сбросов загрязненных сточных вод в поверхностные водные объекты, при заданном уровне экономических показателей развития региона.

Для этого выделены наиболее существенные показатели, которые характеризуют развитие региона в разных секторах деятельности, например, таких как, внешнеэкономический, реальный, банковский сектора и сектор домашних хозяйств. Конкретные показатели, а также их взаимное влияние показаны на рис. 1.

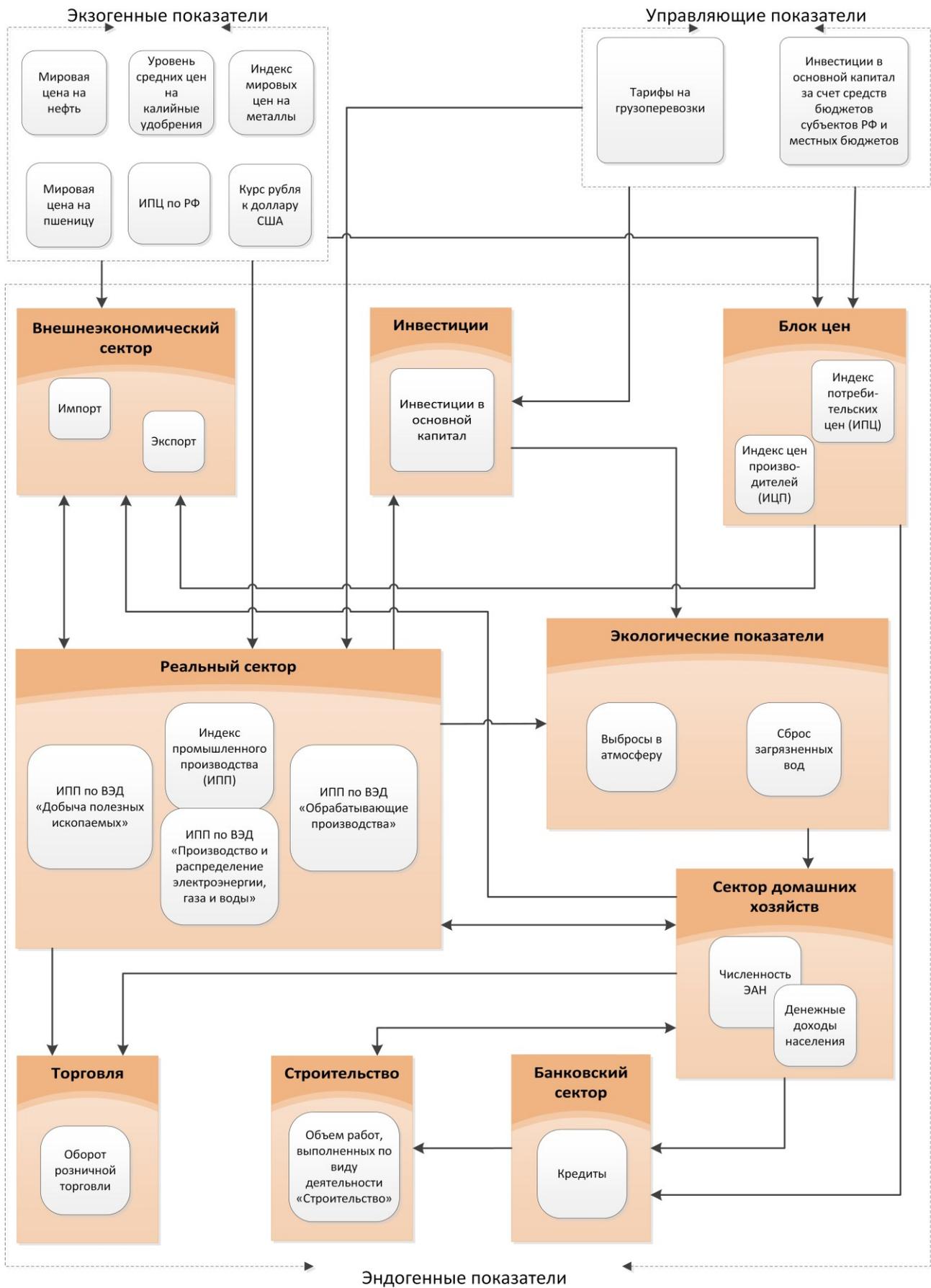


Рис. 1. Концептуальная схема взаимосвязей показателей в модели Пермского края

В качестве исходной модели используется линейная разностная модель с последствием, разработанная Поносовым Д.А. и Поносовым А.А. Данная модель была переидентифицирована на новых статистических данных, а также разбита на две подсистемы: непрерывную и дискретную. В непрерывную подсистему вошли такие показатели, как объем сбросов загрязненных сточных вод в поверхностные водные объекты и объем промышленного производства по показателю: «Добыча полезных ископаемых». В дискретную подсистему – прочие социо-эколого-экономические показатели, представленные на рис. 1.

Таким образом, включение непрерывной подсистемы в систему линейных разностных уравнений позволило учесть следующие особенности процессов, протекающих в региональной экономической системе.

Например, при моделировании объема промышленного производства по показателю «Добыча полезных ископаемых» — процесса, который в модели считается непрерывным, появляется возможность учета, с одной стороны, непрерывного процесса амортизации оборудования, а с другой – дискретных вливаний инвестиций и выхода на рынок импортной продукции. Другими словами, появляется возможность специфицировать модель следующего вида:

$$\dot{x}_4(t) = -a_4x_4(t) + \sum_{j:t_j < t} b_{2j}y_2(t_j) + \sum_{j:t_j \leq t} \vartheta_{1j}v_1 + f_4(t), \quad t \in [0, T], \quad (8)$$

где $x_4(t)$ - объем промышленного производства по показателю «Добыча полезных ископаемых»; $y_2(t_j)$ – импорт Пермского края; v_1 – инвестиции в основной капитал за счет средств бюджетов субъектов РФ и местных бюджетов; a_4 – амортизация основных производственных средств; b_{2j} – вектор коэффициентов, отвечающих за влияние импорта на объем производства по показателю «Добыча полезных ископаемых»; ϑ_{1j} – вектор коэффициентов, отвечающих за влияние инвестиций на объем производства по показателю «Добыча полезных ископаемых»; $f_4(t)$ – агрегированный показатель, отвечающий за неучтенные в модели факторы.

При моделировании объема сбросов загрязненных сточных вод в поверхностные водные объекты, как непрерывного процесса в модели, учитывается как непрерывное самоочищение окружающей среды, так и дискретный процесс очистки сточный вод производственными методами. Таким образом, появляется возможность специфицировать модель следующего вида:

$$\dot{x}_{16}(t) = -a_{16}x_{16}(t) + \sum_{j:t_j < t} b_{5j}y_5(t_j) + \sum_{j:t_j < t} b_{6j}y_6(t_j) + f_{16}(t), \quad t \in [0, T], \quad (9)$$

где $x_{16}(t)$ - объем сбросов загрязненных сточных вод в поверхностные водные объекты; $y_5(t_j)$ – объем промышленного производства по показателю: «Производство электроэнергии, газа и воды»; $y_6(t_j)$ – объем промышленного производства по

показателю: «Обрабатывающие производства»; a_{16} – коэффициент самоочищения окружающей среды; b_{5j} – вектор коэффициентов, отвечающих за производственную очистку окружающей среды; b_{6j} – вектор коэффициентов, отвечающих за производственное загрязнение окружающей среды обрабатывающими предприятиями; $f_{16}(t)$ – агрегированный показатель, отвечающий за неучтенные в модели факторы.

Добавляя непрерывную подсистему уравнений (8)-(9) к дискретной подсистеме вида (2), формируется единая непрерывно-дискретная экономико-математическая модель экономики региона.

3. Разработана и апробирована методология компьютерного эксперимента в исследовании задач целевого управления регионом на основе непрерывно-дискретной экономико-математической модели. Методология охватывает новый класс динамических моделей, содержащих переменные как непрерывного, так и дискретного аргумента и учитывающих эффекты последствия. На основе разработанной методологии проведен компьютерный эксперимент по исследованию задачи целевого управления для непрерывно-дискретной экономико-математической модели Пермского края с учетом экологических факторов.

В диссертации разработана методология компьютерного эксперимента применительно к задачам целевого управления для непрерывно-дискретных моделей экономики региона. Данная методология применима в случае, когда целью исследования является выявление управляющих воздействий, которые удовлетворяют заданным ограничениям и обеспечивают достижение экстремального значения целевым функционалом.

Методология включает все этапы полного исследования реальных задач управления, начиная с математической постановки задачи целевого управления и заканчивая интерпретацией полученных результатов в исходных терминах реальной экономической задачи, а также содержит этап коррекции задачи в случае ее противоречивости.

Приведем краткое описание основных этапов.

На первом этапе формулируется постановка задачи, которая включает содержательное описание: объект и цель исследования, внутренние и внешние условия, ресурсы, значения параметров или их оценки, возможные способы действий и возможные результаты, другую имеющуюся информацию.

Затем осуществляется построение математической модели, которая имеет вид экстремальной задачи для непрерывно-дискретной системы уравнений: необходимо максимизировать (минимизировать) наиболее важный показатель функционирования

экономической системы на множестве допустимых управлений и траекторий, определяемых заданным набором ограничений. Для реализации этого этапа необходимо:

- ввести обозначения параметров задачи и управляемых переменных;
- построить динамическую модель в виде непрерывно-дискретной системы уравнений;
- построить функцию цели, которая представляет собой математическое выражение зависимости ключевой характеристики проблемной ситуации от переменных, входящих в модель;
- записать систему ограничений, которая представляет собой условия, позволяющие исключить из рассмотрения определенные комбинации модельных переменных.

На следующем этапе при помощи разработанного программного средства непрерывно-дискретная система редуцируется к системе разностных уравнений (дискретизация системы), обеспечивая тем самым применимость адаптированных методов исследования задач линейного программирования к исходной проблеме. Таким образом, программный комплекс определяет в случае непустоты допустимого множества экстремальное значение функционала и соответствующие ему значения переменных, а в случае пустоты – дает рекомендации, какие ограничения целесообразно ослабить, чтобы найти решение откорректированной задачи.

На завершающем этапе дается содержательная интерпретация полученного решения в терминах исходной реальной задачи.

Разработанная методология была применена к следующей экономической задаче. Выработать такие управляющие воздействия, посредством которых будет достигнуто сокращение уровня загрязнения в Пермском крае в 2014 году. В качестве целевого показателя выбрана сумма приростов двух показателей: выбросов загрязняющих веществ в атмосферный воздух, отходящих от стационарных источников, и сбросов загрязненных сточных вод в поверхностные водные объекты за период с 1 кв. 2014 г. по 4 кв. 2014 г. к уровню 2013 г.

Для этого на сформированную модель, описанную в п.2 были наложены ограничения двух классов:

- ограничения на фазовые переменные;
- ограничения на управляющие переменные.

Данные ограничения имеют следующий смысл: для каждого момента времени задан интервал, которому должны принадлежать допустимые значения переменной (интервалы определены по общероссийским прогнозам Министерства экономического развития РФ и прогнозам развития Пермского края, опубликованным на Пермском региональном сервере).

При решении задачи была обнаружена пустота области допустимых значений, что указывает на несогласованность исходных официальных данных. В работе предлагается следующий выход из этой ситуации: исходная модель корректируется на основе подхода, разработанного академиком Ереминым И.И. для статических моделей и обобщенного Поносовым Д.А. на случай динамических моделей. Таким образом удалось решить задачу расширения допустимого множества оптимальным способом за счет релаксации ограничений.

Возможные диапазоны изменений, найденные значения фазовых переменных и величина несогласованности по каждому из ограничений, представлены в таблице 1.

Таблица 1. Ограничения на фазовые переменные и величина несогласованности

Показатель	Средний прирост за 2014 год	Мин. прирост за год	Макс. прирост за год	Несогласованность
Индекс промышленного производства (ОКВЭД), в % к соответствующему периоду прошлого года	103,79	102,4	107,4	0
Инвестиции в основной капитал, в % к соответствующему периоду прошлого года	108,73	93,3	111,3	0
Реальные денежные доходы населения, в % к соответствующему периоду прошлого года	109,2	109,2	110,7	0
Индекс потребительских цен, в % к соответствующему периоду прошлого года	107,82	100	106,1	1,72

Таким образом, корректировки коснулись только одного ограничения - индекса потребительских цен, в % к соответствующему периоду прошлого года. Стоит отметить, что данная корректировка выглядит более чем естественно: для России в целом свойственна недооценка инфляции при планировании бюджета. Так, за 8 последних лет инфляция была недооценена в 6 случаях.

После предлагаемой корректировки, задача оптимального управления становится разрешимой. Найденные значения управляющих переменных представлены в таблице 2.

Таблица 2. Значения управляющих переменных

Показатель	1 кв. 2014	2 кв. 2014	3 кв. 2014	4 кв. 2014	2014
Инвестиции в основной капитал за счет собственных средств, в % к соответствующему периоду прошлого года	125,6	109,5	93,3	93,3	105,4
Тарифы на грузоперевозки, в % к соответствующему периоду прошлого года	100	100	100	100	100

При указанных значениях управляющих переменных, ограничения с указанными корректировками будут выполняться, а значение исходной целевой функции примет значение 17,57, равное сумме годовых приростов выбросов в атмосферу загрязняющих веществ от стационарных источников, в % к соответствующему периоду прошлого года (снижение по сравнению с предыдущим годом на 3,17%) и сброса загрязненных сточных вод в поверхностные водные объекты, в % к соответствующему периоду прошлого года (повышение по сравнению с предыдущим годом на 20,74%).

4. Создан программный комплекс, развивающий систему поддержки принятия решений в части использования нового класса динамических моделей для решения задач целевого управления региональной экономической системой. Преимуществом доработанной СППР является возможность решения задач целевого управления для непрерывно-дискретных экономических моделей, а также динамическая коррекция противоречивых моделей в программном режиме.

Для развития системы поддержки принятия решений по управлению региональной экономической системой в части использования динамических непрерывно-дискретных моделей было проведено исследование, в результате которого установлена возможность обобщения некоторых известных методов на случай непрерывно-дискретных систем. В работе обобщены метод подстановок, метод приведения задачи к канонической форме, а также метод динамической коррекции задачи целевого управления.

Перечисленные методы адаптированы для исследования непрерывно-дискретных моделей, формализованы и запрограммированы в среде моделирования и прогнозирования Prognoz Platform, что позволяет в программном режиме формировать различные варианты систем уравнений динамики (дискретные или непрерывно-дискретные модели), ставить для них различные задачи целевого управления, а также сравнивать найденные решения между собой.

Общая схема использования описанных методов и алгоритмов имеет следующую структуру (см. рис.2):

- на вход в инструментальное средство в среде моделирования Prognoz Platform передается идентифицированная непрерывно-дискретная модель экономики региона вида (1)-(2);
- для данной модели формируется система ограничений вида (3)-(5), целевой функционал вида (6) и критерий оптимизации;
- на основе разработанного алгоритма редукции непрерывно-дискретной модели к системе разностных уравнений идет формирование задачи линейного программирования;
- преобразование полученной задачи линейного программирования к каноническому виду;
- для снижения размерности задачи реализуется метод подстановок к сформированной задаче (для задачи целевого управления развитием Пермского края на основе непрерывно-дискретной модели размерность снижается с 72 до 8 переменных);
- исследование разрешимости задачи линейного программирования; в случае ее разрешимости — переход к следующему пункту алгоритма, в противном случае — запуск алгоритма динамической коррекции;
- решение задачи, формирование найденного решения в исходных терминах задачи и его интерпретация.

Разработанный в среде моделирования Prognoz Platform программный комплекс развивает существующую систему поддержки принятия решений по управлению региональной экономической системой: он позволяет исследовать более широкий класс динамических моделей, дополнительно учитывать факторы с непрерывным изменением во времени, в частности экологические характеристики, выявлять противоречивость реальных задач целевого управления и производить их корректировку в программном режиме.

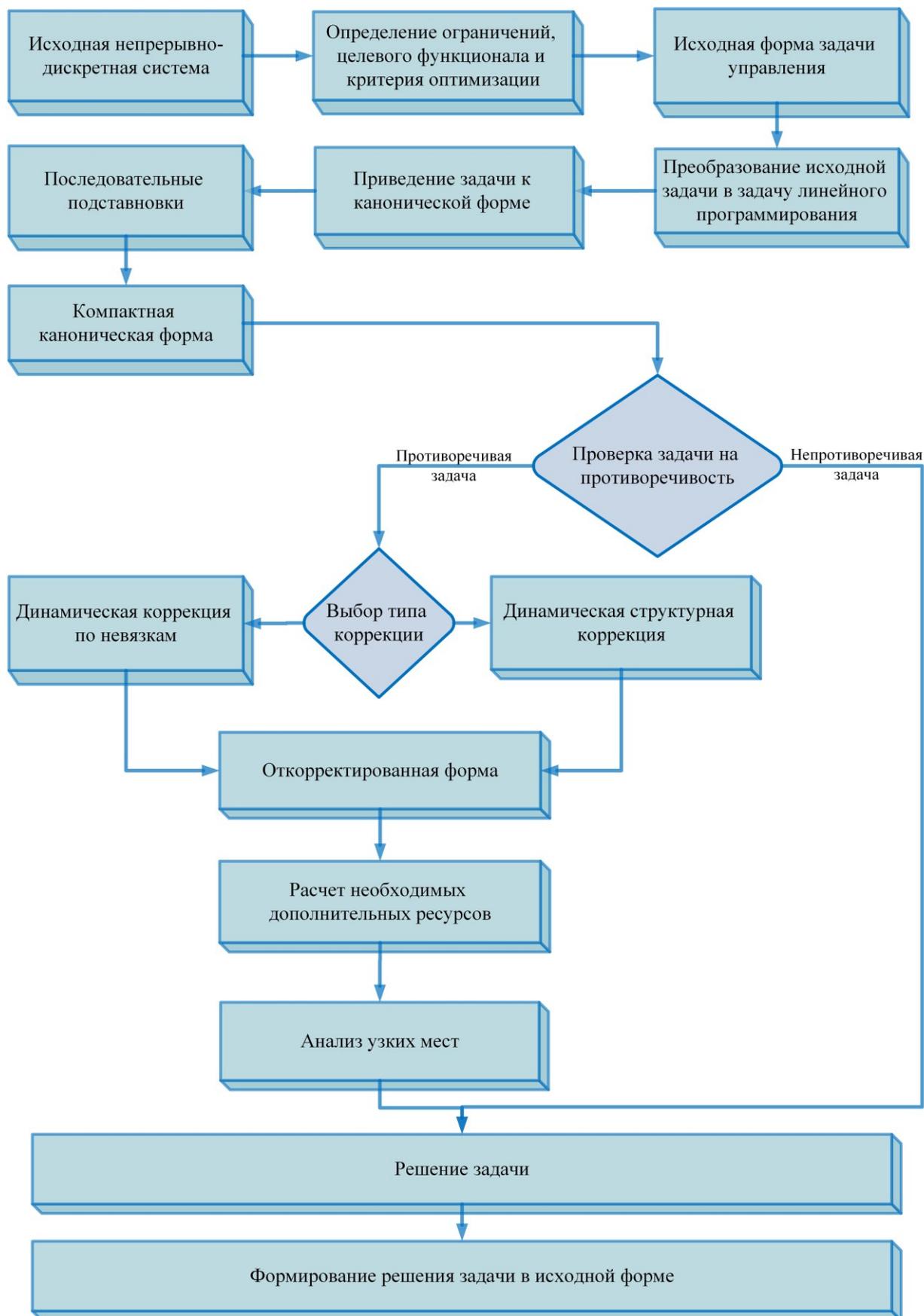


Рис. 2. Алгоритм работы инструментального средства в среде Prognoz Platform

III. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной диссертационной работе решена проблема повышения точности моделирования и управления экономикой региона на основе развития системы поддержки принятия решений в региональной экономической системе с использованием непрерывно-дискретных экономико-математических моделей. Основу решения составили следующие основные выводы, полученные в диссертационной работе:

1. Предложен метод расчета параметров сбалансированного развития региональной экономической системы, который повышает обоснованность управленческих решений в политике развития экономики региона за счет дополнительного учета экологических факторов, таких как, выбросы в атмосферу загрязняющих веществ от стационарных источников и сбросы загрязненных сточных вод в поверхностные водные объекты, и типа динамики процессов, протекающих в экономической системе (непрерывные и дискретные процессы).

2. Сформирована динамическая непрерывно-дискретная экономико-математическая модель региона с учетом экологических факторов, которая описывает основные социально-экономические процессы региона и включает как непрерывные процессы, например, самоочищение окружающей среды и непрерывное производство, так и дискретные процессы, в том числе процессы инвестирования и кредитования.

3. Разработанная методология компьютерного эксперимента в исследовании задач целевого управления для непрерывно-дискретных моделей экономики позволяет сформировать задачу целевого управления для непрерывно-дискретной модели развития Пермского края с учетом экологических факторов. На основе решения данной задачи даются практические рекомендации лицам принимающим решения.

4. Созданный программный комплекс развивает существующую систему поддержки принятия решений в региональной экономической системе за счет использования нового класса динамических моделей при моделировании и исследовании реальных экономических систем, а также различных типов, происходящих в них процессов, как дискретных, так и непрерывных. Он позволяет осуществлять переход от одного класса моделей к другому, строить оптимальные управляющие воздействия, соответствующие им траектории и прогнозы для них, и предоставляет возможность сравнения полученных результатов с результатами сценарного управления.

IV. ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Статьи в рецензируемых научных журналах, рекомендованных ВАК при Министерстве образования и науки РФ

1. Андрианов Д.Л., **Поносов А.А.**, Поносов Д.А. Целевое управление процессом развития текстильно-швейной отрасли Российской Федерации // Вестник Пермского университета. Серия: Экономика. 2011. № 4. С. 92-101. – 0,63 п.л.
2. **Поносов А.А.** Задача управления для динамической модели эколого-экономического развития // Вестник Тамбовского университета. Серия: Естественные и технические науки. 2013. Т. 18. № 5-2. С. 2643-2644. – 0,13 п.л.
3. **Поносов А.А.** Об одной задаче целевого управления для непрерывно-дискретной эколого-экономической модели развития Пермского края // Управление экономическими системами: электронный научный журнал. 2015. Т. 6 (78). - URL: <http://www.uecs.ru/>. – 1,19 п.л.
4. **Поносов А.А.**, Поносов Д.А. Задача оптимального управления для модели текстильно-швейной отрасли Российской Федерации // Вестник Тамбовского университета. Серия: Естественные и технические науки. 2011. Т. 16. № 4. С. 1157-1159. – 0,14 п.л.
5. **Поносов А.А.**, Поносов Д.А. О моделировании эколого-экономического развития региона // Экономика, статистика и информатика. Вестник УМО. 2012. № 4. С. 142-146. – 0,36 п.л.

Статьи и научные публикации в других изданиях

6. Мартышевский И.А., **Поносов А.А.** Постановка, анализ и коррекция задачи оптимального управления эколого-экономическим развитием региона в среде моделирования «Prognoz Platform» // VIII Всероссийская научная конференция с международным участием «Математическое моделирование развивающейся экономики, экологии и технологий». Москва, 2014. С. 61. – 0,06 п.л.
7. **Поносов А.А.** К вопросу об управлении развитием региона с учетом экологических факторов // Актуальные проблемы экономики и управления: сборник материалов международной научной конференции. Москва, 2013. С.50-53. – 0,29 п.л.
8. **Поносов А.А.**, Поносов Д.А. О задаче управления для одной отраслевой модели // Экономика и управление: актуальные проблемы и поиск путей решения: тез. регион. науч.-практ. конф. молодых ученых и студ. Перм. гос. ун-т. Пермь, 2011. С.118-121. – 0,13 п.л.
9. **Поносов А.А.**, Поносов Д.А. Постановка, анализ и коррекция задачи оптимального управления развитием текстильно-швейной отрасли РФ. // VI Всероссийская научная конференция «Математическое моделирование развивающейся экономики, экологии и биотехнологий (ЭКОМОД-2011)», г. Киров, 27 июня-3 июля 2011. Сборник тезисов. ВятГУ. Киров, 2011. С. 80. – 0,06 п.л.

10. **Поносов А.А.**, Поносов Д.А. К вопросу об оптимальном управлении текстильно-швейной отраслью РФ // Экономика и управление: актуальные проблемы и поиск путей решения: сб. статей регион. науч.-практ. конф. молодых ученых и студ. Перм. гос. ун-т. Пермь, 2011. С. 45-52. – 0,5 п.л.

11. **Поносов А.А.**, Поносов Д.А. К вопросу о моделировании воздействия промышленного сектора на экологию // Всероссийская студенческая олимпиада по направлению «Статистика» и специальности «Математические методы в экономике». Сборник научных трудов. МЭСИ. Москва, 2011. С. 139-146. - 0,5 п.л.

12. **Поносов А.А.**, Поносов Д.А. К вопросу о моделировании эколого-экономического развития региона // Теория управления и математическое моделирование: труды конференции. Изд-во ИжГТУ. Ижевск, 2012. С. 62-63. – 0,13 п.л.

13. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2012612107. Программный комплекс динамической коррекции противоречивых линейных динамических экономико-математических моделей (ПК ДКПЛДЭММ) / Д.Л. Андрианов, М.Ю. Кулаков, Д.А. Поносов, **А.А. Поносов**, Д.Н. Шульц. Заявитель и патентообладатель ЗАО «ПРОГНОЗ» – №2011660139; заявлено 27.12.2011; опубликовано 24.02.2012.

14. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2014614039. Программный комплекс решения задач оптимального управления на основе непрерывно-дискретных моделей (ПК РЗОУОНДМ) / Д.Л. Андрианов, М.Ю. Кулаков, И.А. Мартышевский, **А.А. Поносов**, А.Л. Чадов. Заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВПО «Пермский государственный национальный исследовательский университет» – №2014611561; заявлено 27.02.2014; опубликовано 14.04.2014.

15. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2014614044. Система идентификации непрерывно-дискретных экономико-математических моделей (СИНДЭММ) / Д.Л. Андрианов, М.Ю. Кулаков, С.Ю. Култышев, И.А. Мартышевский, **А.А. Поносов**, Е.А. Попова, А.Л. Чадов. Заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВПО «Пермский государственный национальный исследовательский университет» – №2014611590; заявлено 27.02.2014; опубликовано 14.04.2014.

Формат А5

Тираж 100 экз.

Бумага офсетная. Печать цифровая.

Заказ № 54146-15-КЦ

Типография ООО “МДМпринт”

(Печатный салон МДМ)

119146, г. Москва, Комсомольский пр-кт,

д.28 Тел. 8-495-256-10-00