

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт динамики систем и теории управления
имени В.М. Матросова
Сибирского отделения Российской академии наук

На правах рукописи

Столбов Александр Борисович

**Математическое и алгоритмическое обеспечение
исследования региональных
медико-эколого-экономических систем**

Специальность – 05.13.01

Системный анализ, управление и обработка информации
(региональные народнохозяйственные комплексы)

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель:
д. ф.-м. н., профессор
В.А. Батурин

Иркутск – 2016

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	5
1 АНАЛИТИЧЕСКИЙ ОБЗОР СОВРЕМЕННОГО СОСТОЯНИЯ МЕТОДОВ И СРЕДСТВ ИССЛЕДОВАНИЯ МЕДИКО-ЭКОЛОГО-ЭКОНОМИЧЕСКИХ СИСТЕМ	12
1.1 Обзор подходов к построению эколого-экономических, медико- эколого-экономических и социо-эколого-экономических моделей	12
1.1.1 Эконометрические модели	13
1.1.2 Балансовые модели	17
1.1.3 Вычислимые модели общего равновесия	20
1.1.4 Имитационные модели	22
1.2 Обзор компьютерных систем поддержки математического моделирования	27
1.3 Обзор модельно-компьютерного инструментария «Регион»	29
1.3.1 Комплекс эколого-экономических моделей «Регион»	30
1.3.2 Пакет прикладных программ «Регион»	33
1.4 Выводы по обзору	37
2 МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И АНАЛИЗ СИСТЕМ НА ОСНОВЕ ИДЕАЛИЗИРОВАННОГО ЭКСПЕРИМЕНТА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЭКСПЕРТНОЙ ИНФОРМАЦИИ	39
2.1 Информационные проблемы моделирования динамических систем и вычислительный эксперимент	39
2.1.1 Проблема дефицита информации при построении моделей динамических систем	39
2.1.2 Математическая модель динамической системы и ее линеаризация	41
2.1.3 Концепция идеализированного эксперимента, экспертные знания и вычислительный эксперимент	44

2.2 Общий алгоритм построения математической модели динамической системы	47
2.3 Способы идентификации, их модификации и процедуры применения.	48
2.3.1 Компонентные эксперименты	49
2.3.2 Тиражирование моделей	53
2.3.3 Идентификация по серии экспериментов.....	56
3 АЛГОРИТМИЧЕСКОЕ И ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДЛЯ СИСТЕМНОГО АНАЛИЗА МЕДИКО-ЭКОЛОГО-ЭКОНОМИЧЕСКИХ ПРОБЛЕМ РАЗВИТИЯ РЕГИОНА	58
3.1 Процесс поэтапного формирования модели динамической системы....	58
3.1.1 Информационно-логические описания	60
3.1.2 Процедуры формирования математической модели	63
3.2 Многовариантный сценарный анализ	68
3.2.1 Система стандартных сценариев	69
3.2.2 Оптимизационные сценарии.....	71
3.3 Архитектура программного комплекса	72
3.3.1 Модуль «Расчет»	75
3.3.2 Экспертная система «Расчет–CLIPS»	81
3.3.3 Вспомогательные модули	82
4 ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ И ПРИКЛАДНЫЕ ЗАДАЧИ...	85
4.1 Модель динамики заболеваемости населения	85
4.1.1 Описание модели	85
4.1.2 Особенности применение компонентного эксперимента.....	88
4.1.3 Результаты расчетов для города Ангарска	92
4.2 Модели динамики заболеваемости населения г. Улан-Батор	93
4.2.1 Модель динамики заболеваний населения г. Улан-Батор без учетом возрастной структуры населения	94
4.2.2 Модель динамики заболеваний населения г. Улан-Батор с учетом возрастной структуры населения	97

4.3 Типовая медико-эколого-экономическая математическая модель	100
4.3.1 Структура модели	100
4.3.2 Предметно-ориентированные методики и тиражирование	103
4.3.3 Эколого-экономическая модель России	106
4.3.4 Медико-эколого-экономические модели регионов Азиатской части России	112
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	118
СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ	123
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ	124
ПРИЛОЖЕНИЕ А	137
ПРИЛОЖЕНИЕ Б	138
ПРИЛОЖЕНИЕ В	154
ПРИЛОЖЕНИЕ Г	157

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования. В настоящее время исследование взаимодействия экологических и экономических систем с учетом здоровья населения представляет значительный интерес во всем мире. Рассматриваются взаимодействующие сферы: экономика региона, состояние природных ресурсов и уровень техногенной нагрузки на окружающую среду и здоровье населения. Все эти взаимодействующие подсистемы тесно связаны между собой, так производство продукции предприятия непосредственно влияет на здоровье (уровень шума, вибрации, температура и другие факторы), на экологию (загрязнение воды и воздуха, лесные ресурсы и др.), через состояние воздушной и водной среды на заболеваемость. Присутствует и обратное влияние на экономику. В литературе такие системы принято называть медико-эколого-экономическими [50].

Одним из ключевых этапов таких исследований является разработка математических медико-эколого-экономических моделей (МЭЭМ). Построение МЭЭМ является сложной задачей, вызванной междисциплинарным характером предметной области и отсутствием общепризнанных формальных принципов их разработки. Результаты моделирования востребованы не только в научной среде, но и при разработке социально-экономической политики регионов разных уровней (страна, область, город).

К настоящему времени накоплен богатый опыт в изучении динамических систем, разработаны разнообразные методологические подходы. Проблемам разработки моделей динамических систем и методам их исследования посвящены работы В.А. Батурина, О.М. Белоцерковского, А.С. Булдаева, Н.П. Бусленко, С.Н. Васильева, А.Ю. Горнова, Н.И. Грачева, В.И. Гурмана, А.В. Данеева, В.А. Дыхты, Ю.Г. Евтушенко, С.В. Емельянова, Э. Квейда, П.С. Краснощёкова, А.А. Красовского, Н.Н. Красовского, И.А. Крылова, А.Б. Куржанского, Л.В. Массель, М. Месаровича, Н. Н. Моисеева, Ю.Н. Павловского, А.А. Петрова, Г.С.

Поспелова, И.Г. Поспелова, А.А. Самарского, Б.Я. Советова, В.А. Срочко, Дж. Форрестера, Ф.Л. Черноусько, Р. Шеннона и др.

Широко известны самые общие принципы и этапы исследований при разработке математических моделей: концептуализация, идентификация, вычислительные эксперименты, принятие решений. Практическая реализация этих этапов зависит от многих факторов: особенностей моделируемого объекта, условий его наблюдения, степени его сложности, сроков исследования и т.п.

Однако при моделировании многокомпонентных систем междисциплинарного характера возникают проблемы, связанные с тем, что концепция модели в целом неизвестна или далеко не полна, и имеется острый дефицит данных, необходимых для построения модели, которые невозможно восполнить за счет активных экспериментов над объектом в целом.

Каждая конкретная модель является результатом совместной работы коллектива экспертов, представляющих исследуемые предметные области, и специалистов в области математического моделирования. Современные средства автоматизации моделирования (САМ), такие как MatLab, PowerSim, iThink, AnyLogic и т.п., предоставляют пользователю возможность определения отношений между компонентами модели (вычислительными модулями) и правил их сборки. Основными задачами САМ является построение эффективной вычислительной процедуры, многовариантные расчеты с целью оптимизации и настройки параметров, организация обмена данными между модулями, отображение результатов. Этот набор задач типичен для многих технических и иных систем, где имеются готовые концепции математических моделей и широкие возможности информационного обеспечения для их идентификации.

Проблемы, связанные с обработкой больших объемов разнородной и сложно организованной информации и невозможностью проведения активных экспериментов над объектом исследования, а также задача сохранения и повторного использования опыта для совместной работы экспертов из разных областей знаний при создании модели, приводят к необходимости в разработке математическое и алгоритмическое обеспечение для исследования региональных

медико-эколого-экономических систем. Применение этого обеспечения позволит осуществить поддержку процесса создания и исследования МЭЭМ на следующих этапах: формирование и интерпретацию информационного наполнения; определение состава показателей модели; выбор математических соотношений, задающих модель; параметрическую идентификацию; верификацию; формирование сценариев, проведение многовариантных расчетов и анализ результатов. Перечисленные проблемы и задачи и определяют актуальность исследования.

Цель и задачи исследования. Целью исследования является разработка новых и совершенствование существующих методов и средств исследования региональных медико-эколого-экономических проблем на основе процедур системного анализа и технологии математического моделирования.

Для достижения поставленной цели решаются следующие задачи:

- анализ современных подходов, методов и программных средств построения математических моделей медико-эколого-экономических систем;
- разработка алгоритма формирования динамических моделей медико-эколого-экономических систем;
- разработка алгоритмов применения методов параметрической идентификации в условиях дефицита информации;
- разработка интеллектуального программного комплекса для поддержки
- исследования региональных медико-эколого-экономических систем;
- исследование медико-эколого-экономических систем в регионах Иркутской области, Республики Бурятия, г. Улан-Батор (Монголия) и др.

Методы исследований. В работе использованы методы системного анализа, математического моделирования, оптимального управления, искусственного интеллекта, экспертных систем, вычислительного эксперимента, а также конкретные методы параметрической идентификации в условиях дефицита информации (идеализированные эксперименты), которые представлены в работах: Модели управления природными ресурсами / под ред. В.И.Гурмана. М.:

Наука, 1981; Эколого-экономические системы: модели, информация, эксперимент / В.И. Гурман, В.А. Дыхта, Н.Ф. Кашина и др. – Новосибирск: наука, 1987; Эколого-экономическая стратегия развития региона / В.И. Гурман, Е.В. Данилина и др. – Новосибирск: Наука, 1990.

Научную новизну работы составляют следующие **результаты, выносимые на защиту**:

1. Алгоритмы определения параметров моделей управляемых медико-эколого-экономических систем на основе обработки формализованной экспертной информации о закономерностях в предметной области с учетом специфики региона.

2. Методическое, алгоритмическое и программное обеспечение интеллектуальной поддержки исследования региональных медико-эколого-экономических систем, позволяющее проводить их многовариантный сценарный анализ с использованием процедур системного анализа и технологии математического моделирования.

3. Медико-эколого-экономические модели и сценарные расчеты на основе задания различных вариантов управления (инвестиций) для Иркутской области, Республики Бурятия и Азиатской части России, а также для города Улан-Батор (Монголия).

Первые два результата, вошедшие в диссертационную работу, получены соискателем самостоятельно. Третий результат получен в неделимом соавторстве с Батуриным В.А., Ефимовой Н.В., Маловым В.Ю., Мелентьевым Б.В., Урбановичем Д.Е., С. Буднямом.

Практическая ценность основных результатов диссертационного исследования связана с созданием специализированного математического и программного обеспечения, которое позволило повысить эффективность процесса построения и исследования моделей медико-эколого-экономических систем.

Результаты работы использованы в ходе исследований, проводимых в рамках НИР по проектам: проект РГНФ № 03-02-00105а «Моделирование, оценка и прогнозирование здоровья населения региона в зависимости от социальных,

экологических и экономических факторов» (2003-2005 гг.); проект РГНФ № 06-02-00055а «Социо-эколого-экономические стратегии развития региона» (2006-2008 гг.); междисциплинарный интеграционный проект СО РАН № 40 «Системный анализ условий развития Азиатской части России: опыт истории, методология прогнозирования и управления в новых геополитических условиях и институциональной среде» (2006-2008 гг.); междисциплинарный интеграционный проект СО РАН № 79 «Азиатская часть России: интеграционные факторы роста и новые глобальные вызовы» (2009-2011 гг.); совместный грант № 1 СО РАН и Академии наук Монголии «Математическое моделирование и информационные технологии в задачах оценки и прогнозирования здоровья населения города Улан-Батор в зависимости от социальных, экологических и экономических факторов» (2013-2014).

Апробация работы. Результаты работы докладывались и обсуждались на следующих конференциях: 7-ая международная конференция «Проблемы управления и моделирования в сложных системах», Самара, 2005; VI Всероссийская конференция с международным участием «Новые информационные технологии в исследовании сложных структур» - ISAM'06, Шушенское, 5-8 сентября 2006; XII Всероссийская конференция «Информационные и математические технологии в науке и управлении», 2007; международная школа семинар молодых ученых «Информационные технологии и моделирование социальных эколого-экономических систем» - Иркутск (Россия) - Ханх (Монголия), 1-6 октября 2008; XIV Байкальская международная школа-семинар «Методы оптимизации и их приложения», 2 -8 июля 2008, Иркутск-Северобайкальск; Всероссийская научно-практическая конференции «Имитационное моделирование. Теория и практика», Санкт-Петербург, 21-23 октября 2009; XV Байкальская Международная школа-семинар «Методы оптимизации и их приложения», Иркутск – Листвянка, 23-29 июня 2011; Российская школа-семинар «Модели и методы исследования гетерогенных систем», с. Дивноморское, Краснодарский край, 24 - 29 сентября 2012.

По результатам работы опубликованы 12 работ (8 в журналах из перечня ВАК). Имеется справка о внедрении результатов диссертационной работы в Восточно-Сибирском научном центре Экологии человека РАН.

Диссертация содержит 166 страниц, состоит из введения, четырех основных глав, заключения, списка сокращений, списка использованной литературы и четырех приложений.

В первой главе приведен аналитический обзор современного состояния методов и средств исследования медико-эколого-экономических систем.

Рассмотрено четыре основных класса математических моделей, используемых при исследовании эколого-экономических, медико-эколого-экономических и социо-эколого-экономических систем: эконометрические, балансовые, имитационные и вычислимые модели общего равновесия. Проведен обзор популярных программных средств поддержки математического и имитационного моделирования.

Особое внимание в обзоре уделяется модельно-компьютерному инструментарию, применявшемуся в работах, связанных с моделированием медико-эколого-экономического состояния Байкальского региона. Подробно рассматриваются модели первого и второго уровня модельного комплекса «Регион», а также пакеты прикладных программ для проведения эколого-экономических расчетов. Такое подробное описание связано с тем, что именно подходы, применяемые при построении модельного комплекса «Регион», являлись основой для предлагаемых методов и средств формирования медико-эколого-экономических моделей.

Во второй главе рассматриваются проблемы математического моделирования моделей динамических систем в условиях дефицита информации. Предлагается общий алгоритм формирования модели, и рассматриваются варианты его реализации.

В третьей главе рассматривается методическое, алгоритмическое и программное обеспечение, применяемое для исследования региональных медико-эколого-экономических систем с использованием описанных в главе 2 подходов.

Предлагается методика интерактивного поэтапного построения модели, которая задает информационные структуры и процедуры их обработки для реализации общего алгоритма формирования модели.

В четвертой главе представлены результаты применения разработанных методов и средств для построения и исследования:

- эколого-экономической модели Европейской и Азиатской части России;
- медико-эколого-экономической модели регионов Сибири;
- модели динамики заболеваемости населения города Ангарска Иркутской области;
- модели динамики заболеваний населения г. Улан-Батор (Монголия).

Дается подробное описание структуры построенных моделей, приведены примеры использования компонентных экспериментов и процедур тиражирования. Представлены результаты многовариантных сценарных расчетов.

В приложении А содержится справка о внедрении результатов работы в ФГБУ «Восточно-Сибирский научный центр Экологии человека» РАМН.

В приложении Б приведены примеры вычислительных функций, продукционных правил и информационно-логического описания предметной области, использованных для формирования конкретных математических моделей динамических систем.

В приложении В описываются методики анализа и оценки сценарных расчетов для моделей динамики заболеваемости населения.

В приложении Г описывается процедура исследования медико-эколого-экономической задачи оптимального управления с применением магистральных решений.

1 АНАЛИТИЧЕСКИЙ ОБЗОР СОВРЕМЕННОГО СОСТОЯНИЯ МЕТОДОВ И СРЕДСТВ ИССЛЕДОВАНИЯ МЕДИКО-ЭКОЛОГО- ЭКОНОМИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Диссертационная работа посвящена проблемам построения комплексных математических моделей медико-эколого-экономических систем регионального уровня. При проведении аналитического обзора основное внимание уделялось моделям, описывающим взаимодействие между такими компонентами как экономика, природная среда, экология и заболеваемость населения. При этом описываемое взаимодействие в таких моделях обычно рассматривается на высоком уровне агрегирования показателей: выпуски по отраслям хозяйства, загрязнение природной среды региона, обращаемость населения за медицинской помощью и т.п. Исходя из специфики диссертационного исследования, в обзоре не отражены частные модели, описывающие процессы в отдельных компонентах медико-эколого-экономических систем.

1.1 Обзор подходов к построению эколого-экономических, медико-эколого-экономических и социо-эколого-экономических моделей

В настоящее время разработкой математических и имитационных моделей социо-эколого-экономических систем регионального уровня занимаются коллективы авторов из разных стран мира. Большое количество публикаций не позволяет привести в рамках одного обзора все или большую часть существующих моделей. Поэтому далее рассматриваются только основные направления исследований, разбитые по типу используемых математических и компьютерных методов на 4 группы: эконометрические, балансовые, имитационные модели и вычислимые модели общего равновесия.

1.1.1 Эконометрические модели

При построении эконометрической модели выбирается определенный набор наблюдаемых статистикой экономических показателей и темпы роста этих величин и методами математической статистики изучаются корреляционные связи между временными рядами этих показателей. Если оказывается, что ряд значений какой-то величины раскладывается по остальным с небольшой и независимой погрешностью, то считается, что обнаружена некоторая закономерность в экономике: первая величина зависит от остальных.

Применение моделей эконометрического типа позволяет исследовать задачи большой размерности, в которых количество переменных и соотношений может достигать нескольких десятков тысяч. Большие эконометрические модели широко применялись в Западных странах в период сравнительно устойчивого роста их экономики в 50-70 гг. XX в. [93]. В этот период они давали прогноз многих экономических показателей на год в вперед, который оправдывался с точностью 2-3%.

В России это направление развивают, например, исследовательские группы С.А. Айвазяна, В.И. Аверина, С.В. Дубовского. Эконометрическая модель, содержащая около 10 переменных используется в Минэкономразвития России [33] для целей сценарного прогнозирования. Кроме того, небольшие эконометрические модели широко используются для предварительной обработки данных в моделях других типов и в различных компьютерных системах обработки экономической информации.

Сильная сторона эконометрических моделей в их относительной независимости от использующихся статистическими органами методик сбора и обработки исходных данных. Слабая сторона в том, что эконометрические модели только констатируют существование связи величин, но не помогают ее объяснить. Эконометрические модели на этапе построения требуют

больших массивов данных, собранных по единой методике за большой промежуток времени.

Распространение специализированных программных средств автоматизации расчетов [83, 110] и расширение возможностей офисного программного обеспечения (например, MS Excel) инструментами для проведения статистического анализа и разработки эконометрических моделей позволило специалистам из разных предметных областей (экономика, экология, медицина, биология) в рамках своих исследований создавать разнообразные регрессионные модели.

В настоящее время существует много работ, посвященных исследованию влияния эколого-экономических факторов на здоровье населения с помощью моделей эконометрического типа [6, 43, 31,].

В качестве типичного примера рассмотрим более подробно работы [69, 70], где предлагается модель экологической безопасности республики Мордовия. Первый блок модели описывает изменения показателей антропогенного загрязнения окружающей среды от 5 характеристик, полученных методом главных компонент [2, с 55] из показателей, отражающих состояние экономики и отчисления на охрану природной среды. Регрессионная модель была идентифицирована на данных Федеральной службы государственной статистики и имеет следующий вид:

$$Y_1 = 109,43 + 20,41F_1 + 3,328F_2 - 5,848F_3 + 1,41t, \quad (1.1)$$

$$Y_2 = 50.981 + 0.762F_1 + 4.62222F_2 + 2,426t, \quad (1.2)$$

$$Y_3 = -187867 + 45633F_1 - 60474F_2 + 36773t, \quad (1.3)$$

где Y_1 – суммарные выбросы загрязняющих веществ в атмосферу; Y_2 – отношение сброса загрязненных вод к забору воды; Y_3 – объемы токсичных отходов; F_1 – интегральная характеристика производственного сектора экономики; F_2 – показатель развития строительства и количества используемых автомобилей; F_3 – уровень эксплуатации автотранспорта; F_4 – характеристика степени удовлетворения потребности экономики и населения

состоянием транспортного сектора; F5 – интегральный показатель охраны окружающей среды от негативного воздействия транспорта.

Второй блок модели составляют четыре уравнения с распределенными лагами, отражающие зависимость медико-демографических показателей от факторов антропогенного загрязнения окружающей среды из первого блока (Y_1, Y_2, Y_3):

$$D1_t = 0,303 + 0,082Y_{2t} + 0,074Y_{2t-2} + 0,066Y_{2t-2}, \quad (1.4)$$

$$D2_t = 0,041 + 0,1Y_{1t} - 0,026Y_{1t-1} - 0,07Y_{1t-2} - 0,03Y_{1t-3} + 0,1Y_{1t-4}, \quad (1.5)$$

$$D3_t = 38,15 + 0,87Y_{2t} - 0,008Y_{2t-1} - 0,35Y_{2t-1} - 0,157Y_{2t-3} + 0,57Y_{2t-4}, \quad (1.6)$$

$$D4_t = 11,94 + 2,633Y_{2t} + 2,375Y_{2t-1} + 2,117Y_{2t-2} + 1,859Y_{2t-3}, \quad (1.7)$$

где $D1_t$ – общий коэффициент смертности; $D2_t$ – коэффициент младенческой смертности; $D3_t$ – ожидаемая продолжительность жизни при рождении; $D4_t$ – заболеваемость на 1000 человек.

Следует отметить, что в модели республики Мордовия первый и второй блок оценивались отдельно, без учета взаимного влияния показателей антропогенного загрязнения окружающей среды и медико-демографических показателей. На примере этой модели можно увидеть, что сложно делать обоснованный вывод о вкладе каждого из факторов на результирующие показатели и сформировать единую медико-эколого-экономическую модель, используя простые регрессионные зависимости, потому что необходимо учитывать взаимодействия между исследуемыми факторами. При использовании эконометрических моделей взаимовлияние показателей можно учитывать с помощью систем одновременных уравнений [2, с 105].

М. Фримен одним из первых предложил следующую модель оценки ущерба от загрязнения окружающей среды [86]:

$$\begin{cases} M = a_0 + a_1D + a_2P + u_1 \\ D = b_0 + b_1Y + u_2 \\ Y = c_0 + c_1M + u_3 \end{cases}, \quad (1.8)$$

где M – некоторый показатель заболеваемости; P – воздействие загрязнителей на окружающую среду; D – доступ к медицинскому

обслуживанию; Y – средний уровень дохода; u_1, u_2, u_3 – остаточные члены; коэффициенты должны иметь следующие знаки: $a_0, a_2, b_1, c_0 > 0$; $a_1, c_1 < 0$.

Модель Фримена была дополнена в работах [55,56]:

$$\begin{cases} M = \alpha_0 + \alpha_1 A_2 + \alpha_2 D + \alpha_3 P + u_1 \\ P = \beta_0 + \beta_1 A_1 + \beta_2 G + \beta_3 Y + u_2 \\ Y = \varphi_0 + \varphi_1 M + u_3 \end{cases}, \quad (1.9)$$

где M – обобщенный показатель заболеваемости населения; A_1 и A_2 – объемы выбросов загрязняющих веществ в атмосферу от стационарных и нестационарных источников; G – объемы сбросов загрязняющих веществ в гидросферу на человека; P – число предприятий загрязнителей на душу населения; D – обеспеченность населения врачами; Y – уровень бедности; $\alpha_1, \alpha_3, \beta_1, \beta_2, \varphi_1 > 0$, $\alpha_2, \beta_3, < 0$.

Предложенная модель была идентифицирована с помощью трехшагового МНК [117] по данным для регионов РФ за 2006 год, проведен сравнительный анализ регионов. На основе модели для каждого региона рассчитывается показатель фонового ущерба $M_{фон} = a_0 + \alpha D$.

В работе [4; 5] предложена модификация рассмотренных выше двух моделей, где для описания зависимости показателя M используется степенная функция:

$$\begin{cases} M = a_0 + D^{a_1} \cdot P^{a_2} \cdot V^{a_3} \cdot W^{a_4} \\ D = b_0 + b_1 I + b_2 L \\ Y = c_0 + c_1 M \end{cases}, \quad (1.10)$$

где V и W – загрязнители, I – среднедушевой доход; P – обеспеченность жильем; остальные переменные имеют тот же смысл, что и в первой модели.

Проведенный обзор научных работ, в которых исследуются социально-эколого-экономические системы, показал, что эконометрические модели являются наиболее распространенным классом математических моделей, применяемых специалистами-предметниками.

1.1.2 Балансовые модели

Балансовые модели возникли как метод обеспечения процедур планирования экономики. Главная часть этих моделей - система материальных балансов для некоторого набора продуктов в совокупности охватывающего все хозяйство. Система балансов содержит много свободных переменных, которые сами по себе аналитикам неинтересны, поэтому систему материальных балансов обычно дополняют моделью Леонтьева, т.е. предположением о том, что прямые затраты продуктов на производство единицы данного продукта слабо изменяются со временем.

В период с 30х по 70е годы XX в., когда корпорации и многие государства практиковали прямое плановое перераспределение материальных ресурсов, балансовые модели широко и систематически использовались в процессах экономического планирования. Их использовал Госплан СССР, а также органы, отвечавшие за индикативное планирование в таких странах как Франция и Япония. Глубокий анализ балансовых моделей проведен в серии публикаций А.Н. Дюкалова, Ю.Н. Иванова, В.В. Токарева [25, 26, 27,28]. В настоящее время направление по разработке балансовых моделей экономических систем развивают, например, коллективы под руководством ак. В.В. Ивантера, А.Р. Белоусова, В.И. Суслова, В.Ю. Малова.

Сильная сторона балансовых моделей в том, что они состоят практически только из самых надежных в экономике балансовых соотношений, причем данные для этих соотношений собираются специально «под модель». Слабая сторона в том, что на языке балансов невозможно выразить отношения между экономическими агентами, поэтому балансовые модели часто не способны уловить фактические проблемы, с которыми сталкивается экономическое развитие. Так как в балансовой модели учитывается максимум несколько тысяч, а обычно несколько десятков продуктов, то «продукты» балансовой модели фактически суть агрегаты,

индексы, построенные из реальных благ с помощью цен, курсов, потоков платежей и бухгалтерских оценок.

Активное применение балансовых моделей для анализа взаимного влияния экономических и экологических процессов начинается в 1970х годах. Выдающийся экономист В. Леонтьев использует разработанный им подход «затраты - выпуск» для учета экологического фактора в межотраслевом балансе [38]. Леонтьев считал, что загрязнение окружающей среды является побочным продуктом любой экономической деятельности, поэтому в модели баланса нужно допустить, что результатами хозяйственной деятельности являются не только «полезные» продукты, но и загрязнения, на переработку которых необходимо тратить определенное количество ресурсов (создавать специальные производственные мощности). Часто незамечаемые и игнорируемые нежелательные побочные продукты (как и некоторые ценные, но неоплачиваемые природные ресурсы) непосредственно связаны с системой физических взаимосвязей, определяющих функционирование экономической системы [39]. Технически взаимозависимость между уровнями выпуска желательных и нежелательных продуктов может быть описана в терминах структурных коэффициентов, аналогичных тем, которые используются для описания связи между обычными отраслями производства и потребления: помимо обычной технологической матрицы вводятся также матрица прямых затрат продукта каждой отрасли на уничтожение единицы загрязнения каждого вида, также матрицы коэффициентов, характеризующих выпуск загрязнителя на единицу выпуска продукта каждой отрасли и выпуск загрязнителя каждого вида на единицу уничтожаемого загрязнителя другого вида (для учета вторичного эффекта загрязнений).

Модель Леонтьева-Форда позволяет определить потери экономики, обусловленные борьбой с загрязнениями, вычислять цены, балансирующие финансы всех отраслей, определять влияние ожидаемых изменений в ценах на условия воспроизводства при той или иной природоохранной стратегии.

На базе предложенного Леонтьевым подхода разработаны и другие балансовые эколого-экономические модели. Например, в работе [3] предложена эколого-экономическая модель, в которую авторами вводится элемент «управление». В модели используется три основных типа переменных: естественные ресурсы; отрасли материального производства; производство загрязняющих веществ.

Предполагалось, что модель позволит изучить «отклик» параметров состояния окружающей природной среды на варьирование важнейших показателей антропогенной деятельности, к которым авторы относят следующие: структура конечного потребления; темпы роста отраслей материального производства, оказывающих наиболее существенное воздействие на различные экологические объекты; затраты на строительство очистных сооружений; затраты на формирование инфраструктуры, включая затраты на рекреацию; объем использования природных ресурсов; объемы экспорта и импорта; численность и структура трудовых ресурсов.

К недостаткам модели следует отнести отсутствие ее практической реализации. Другой недостаток состоит в том, что она регистрирует только объем выброса загрязнителей в окружающую среду, и не рассматривает их воздействие на саму подсистему.

Модель С.В. Дубровского [26] состоит из трех подмоделей: макромоделей экономического роста, модели межотраслевого баланса и блока загрязняющих веществ. Производственными факторами для валового внутреннего продукта являются капитал, труд, НТП, внешнеторговое сальдо. Структура экономики задается межотраслевым балансом (МОБ), который включает 18 отраслей. Межотраслевой баланс распределения продукции включает квадрант традиционного МОБ, квадрант выпуска агрегированного загрязняющего вещества, а также вектор конечного продукта. Блок загрязнений представляет собой строку в системе уравнений баланса. Рассматривается один вид загрязнений – выбросы твердых частиц в воздух.

Одним из основных недостатков модели Дубовского является неравноценность учета экономического и экологического блока: учитывается только один вид загрязнений, а структура экономики рассматривается довольно глубоко.

В работе [61] представлена модель региона, включающая уравнения динамического МОБ и уравнения динамики природных ресурсов, которая может использоваться для анализа сценариев развития региона по совокупности показателей эколого-экономического мониторинга.

Наиболее проработанным и доведенным до серии практических расчетов является комплекс моделей «Регион» [15; 20], которому в первой главе диссертации посвящен отдельный раздел.

1.1.3 Вычислимые модели общего равновесия

Вычислимые модели общего равновесия (Computable General Equilibrium – CGE Models) представляют собой систему нелинейных уравнений, решением которой является набор переменных, отражающих экономическое равновесие. Первой работой по CGE моделированию считается Johansen (1960).

Теоретические основы CGE моделирования восходят к работам Вальраса, Эрроу-Дебре и к Леонтьевской модели затраты-выпуск. Первой теоретической моделью общего равновесия в современной экономической теории принято считать модель Эрроу-Дебре (1952), где развивается Вальрасовский подход к моделированию общего равновесия в экономике. Модель Эрроу-Дебре описывает действия производителей, максимизирующих свою прибыль, и потребителей, максимизирующих свою полезность. Таким образом, формируются спрос и предложение товаров и услуг в экономике.

В отличие от простой теоретической модели, в CGE модели появляется много отраслей, много разных видов потребителей и несколько регионов. Число уравнений в ней исчисляется сотнями. Решить такую систему аналитически невозможно, поэтому используются численные методы. Широкое распространение CGE моделей объясняется разработкой новых алгоритмов расчетов и увеличением производительности вычислительной техники [80].

Примерами CGE моделей могут служить модель Австралийской экономики MONASH [105] или модель MIT EPPA (Emissions Prédiction and Policy Analysis), которая была разработана для исследования изменения климата и влияния на него экологической политики. Она является компонентом более сложной системы MIT Integrated Global System Model [90]. В модели учитываются влияние существующих технологий и технологического прогресса на рост выбросов, и, таким образом, на роль человеческого фактора в изменении климата.

Большинство CGE моделей рассматривают проблемы глобального потепления и контроля за выбросами парниковых газов: модель DICE [103]; модель MERGE [95]; GEM-E3 модель для Европейского союза [75] и другие модели, обзор которых можно найти, например, в [92].

Приведем и другие примеры CGE моделей, связанные с социо-эколого-экономическими процессами:

1. Исследование проблем обезлесения и лесопосадок: [104].
2. Исследование влияния природоохранного законодательства на экономический рост: [91].
3. Экологическая политика в сельском хозяйстве: [88].
4. Исследование экономических потерь от введения экологических стандартов: [78], [87].
5. Исследование проблем развития здравоохранения и влиянии эколого-экономических процессов на заболеваемость населения: [96], [73].

В России первая вычислимая модель экономического равновесия российской экономики RUSEC разработана в 1999 году академиком В.Л. Макаровым [42]. Исходная модель RUSEC и различные ее модификации широко используются для различных целей. В данном обзоре особый интерес представляет модель «Социальная Россия» - модификация RUSEC для прогнозирования изменений, связанных с социальными отраслями экономики – отраслями «здравоохранение» и «образование» [12]. В модели присутствуют пять экономических агентов (государственный сектор экономики, рыночный сектор экономики, теневой сектор, совокупный потребитель, государство) и 3 отрасли экономики (производство обобщенного потребительского блага – товары и услуги, отрасли здравоохранения и образования).

Вычислительный эксперимент, проведенный с использованием модели «Социальная Россия», позволил оценить эффект от реформы по снижению Единого Социального Налога (ЕСН). Согласно результатам вычислительного эксперимента при снижении налоговой ставки ЕСН происходит рост ВВП и валового выпуска в экономике. В социальных отраслях государственного сектора также наблюдается рост производства, что выражается в увеличении выпуска. В рыночном секторе экономики увеличивается заработная плата в социальных отраслях. Выпуск в теневом секторе экономики уменьшается.

1.1.4 Имитационные модели

Имитационное моделирование родилось из попыток применить к описанию сложных систем приемы, разработанные при моделировании технических систем. Основной прием моделирования имитационного моделирования - разделение системы на блоки, отвечающие существенным процессам или объектам, и описание системы составляется из описаний отдельных блоков.

Трудность применения этого метода к моделированию социо-эколого-экономических систем состоит в том, что в отличие от технической системы, которая создается из отдельных частей, экономика возникает в процессе самоорганизации и членение ее на части отнюдь не однозначно. Поэтому созданию имитационной модели предшествует содержательное исследование конкретной ситуации, в результате которого вырабатывается сценарий взаимодействия экономических, экологических, социальных факторов - перечень и качественная характеристика важнейших составляющих описываемой сложной системы.

Имитационные модели обычно довольно сложны - содержат несколько сотен соотношений. Это меньше чем в больших эконометрических моделях, больше, чем в теоретических и примерно столько же, сколько в балансовых. Однако в балансовых моделях большая часть соотношений - это линейные однотипные уравнения балансов, а в имитационных - это нелинейные соотношения, описывающие причинные связи в экономике. Поэтому имитационные модели, как правило, описывают систему в менее подробной номенклатуре показателей, чем балансовые.

Имитационный подход оказывается достаточно плодотворным при моделировании социально-экономических процессов [57].

Разработаны крупномасштабные модели для анализа экологических проблем отдельных отраслей промышленности, например, модель MARKAL [108]. Развиваются проекты по построению систем моделей, описывающих частные экологические процессы - проект ЕСОРATH [76] по моделированию водных экосистем для каждого региона Земли. Актуальны работы по системному анализу и комплексному математическому моделированию совместной эволюции экологии, экономики и социальной сферы.

Главными достоинствами имитационной модели является ее ориентация на конкретную экономическую ситуацию, а также способность не только воспроизводить, но и объяснять наблюдаемую динамику экономических показателей через описанные в модели причинно-

следственные связи. Вообще, имитационные модели более пригодны для аналитических, чем для чисто прогнозных расчетов.

Поскольку методика имитационного моделирования не исключает использования приемов, применяемых при создании моделей других типов, главным недостатком имитационных моделей является трудоемкость их разработки и идентификации, а также необходимость существенно пересматривать модель при изменении сложившихся экономических отношений.

Модели системной динамики. С методологической точки зрения среди различных способов имитационного моделирования, применяющихся при исследовании социо-эколого-экономических систем, выделяется подход «системной динамики». Системно-динамический подход использует математический аппарат обыкновенных дифференциальных уравнений, разностных уравнений и методы компьютерного моделирования, но обладает рядом особенностей, связанными со специфическими правилами построения, использования и интерпретации получаемых моделей систем. Согласно [111, 62], основными принципами системной динамики являются следующие утверждения:

1. Поведение системы – это следствие проявления ее структуры и взаимодействия ее элементов;
2. Структура системы и характер взаимосвязей между элементами системы, определяющие ее поведение, более важны, нежели количественные оценки для понимания поведения системы;
3. Состояние системы и ее структура есть причина изменений, а не их результат;
4. Проблемы возникают внутри системы, а не вне ее;
5. Изучить систему – значит определить ее состав и установить отношения между ее элементами, то есть структуру;
6. Определяющее значение в поведении системы имеет взаимодействие контуров обратной связи в ее структуре;

7. В контурах обратной связи и консервативных подсистемах всегда присутствуют уровни и темпы;

8. Уровни и темпы являются необходимыми и достаточными переменными для описания любой динамической системы;

9. При изучении системы важно концентрировать внимание на анализе действенности политик (управленческий аспект), а не на точном получении количественных оценок.

Следовательно, при построении моделей системной динамики внимание уделяется воспроизведению качественного поведения системы, а не точности получаемых количественных результатов (пункты 2, 9). В частности в [62] указываются примеры требований, при выполнении которых можно считать модель идентифицированной:

1. модель должна выходить на все равновесные траектории, присущие системе;

2. модель должна адекватно, но необязательно точно, отражать время перехода между равновесными (квазистационарными) состояниями;

3. модель должна передавать динамику процессов, протекающих в системе как в состоянии равновесия (то есть описывать установившиеся процессы, включающие в себя колебательный режим или стабильное управление), так и в переходный (переходные процессы).

Для создания моделей используются специальные конструкции, взаимодействие которых определяет поведение системы (пункты 5, 6, 7, 8).

1. Уровни – характеризуют накопленные значения внутри системы, т.е. суммирование всех изменений, которые «входят» и «выходят» в/из уровня. Это могут быть запасы, задолженность, численность населения и др.

2. Потоки – скорости изменения уровней.

3. Вспомогательные (информационные) переменные или конвертеры используются для моделирования элементов системы, которые могут изменяться мгновенно (в отличие от уровней). Конверторы задаются через алгебраические уравнения.

В отличие, например, от балансовых моделей в системной динамике присутствует явное разделение множества переменных модели на материальные (уровни) и информационные (*auxiliary variables, convertors*), что оказывает существенное влияние на процесс вычислений, так как значения первых рассчитываются как решения дифференциальных уравнений, а значения вторых как решения алгебраических.

Для поддержки процесса моделирования используются графические представление конструкций системной динамики в форме потоковых (*stock-and-flow*) диаграмм.

Подход системной динамики был разработан и предложен Джеймсом Форестером в конце 1950х при исследовании промышленной деятельности предприятия [84, 85]. В дальнейшем на основе принципов системной динамики им были созданы модели «Мир-1» и «Мир-2» [67]. Появление этих моделей дало мощный импульс для начала интенсивных разработок глобальных моделей, отражающих эколого-экономические процессы: «Мир-3» или «Пределы роста» [45]; модель развивающихся стран [107]; «США на пороге XXI-го века» и аналогичные модели, разработанные для других государств (Туниса, Бангладеш, Малави и др.) [100]; модель использования невозобновимых природных ресурсов У. Беренса [74] и ее модернизация [116]; модели использования возобновляемых ресурсов [98].

В настоящее время исследования по разработке социо-эколого-экономических моделей системной динамики ведутся во многих научных группах и институтах по всему миру: Международный институт прикладного системного анализа [89]; Массачусетский технологический институт [101]; Институт Тысячелетия [99]; Азиатский институт технологий [72]; ИСА РАН, ЦЭМИ РАН, ИПУ РАН и других учебных и научных учреждениях России.

1.2 Обзор компьютерных систем поддержки математического моделирования

Инструментальные пакеты для поддержки процесса математического моделирования можно разделить на две группы [35] (рисунок 1.1). К первой относятся специализированные программные средства, ориентированные на специфические понятия конкретной прикладной области (химической технологии, теплотехники, электротехники и т.д.). Ко второй относятся так называемые «универсальные» пакеты, ориентированные на определенный класс математических моделей и применимые для любой прикладной области, в которой эти модели пригодны.

«Универсальные» пакеты далее обычно разделяют на «математические» пакеты и пакеты компонентного моделирования. В «математических» пакетах (Mathematica, MathCAD, MatLab, Maple, Eviews) предполагается, что математическая модель всей моделируемой системы уже каким-либо образом построена и ее требуется исследовать. Такой подход характерен в основном для научных исследований. Как правило, математические пакеты сочетают численные эксперименты с символьными преобразованиями.

Компонентное моделирование предполагает, что описание моделируемой системы строится из компонентов (мелкомасштабных стандартизированных), а совокупная математическая модель формируется пакетом автоматически, т.е. содержательный смысл разрабатываемой исследователем модели подгоняется под язык системы моделирования, а проверка корректности модели сводится к следованию принятым форматам. Пакеты компонентного моделирования в основном ориентированы на численные эксперименты. Далее приведены примеры наиболее известных пакетов компонентного моделирования.

Arena – представляет собой среду, нацеленную на разработку моделей, связанных с деятельностью предприятий.



Рисунок 1.1 – Классификация программных средств математического моделирования

Программный комплекс «Моделирование в технических устройствах» («МВТУ») [44] - современная среда интеллектуального САПР, предназначенная для детального исследования и анализа нестационарных процессов в системах автоматического управления Разработана в Московском Государственном Техническом Университете им. Н.Э.Баумана.

Model Vision Studium [102] разработанная коллективом ученых из Санкт-Петербургского Государственного Технического Университета под руководством д.т.н. Колесова Ю.Б., д.т.н. Сениченкова Ю.Б. Позволяет моделировать физические объекты и явления на основе их аналитического описания, представляемого в общем случае системами дифференциально-алгебраических уравнений.

Simulink один из самых известных систем компонентного моделирования, входит в состав пакета Matlab

iThink – мощный инструмент, основанный на принципах системной динамики, используется ведущими консалтинговыми фирмами мира. А также в ситуационном центре при правительстве России

PowerSim - продолжение разработок Форестера.

AnyLogic – российская разработка, объединяющая в одном комплексе конструирование моделей динамических систем, использование языка системной динамики, дискретно-событийного подхода, а также агентного моделирования.

ЭКОМОД (Поспелов И.Г., Завриев С.К., Поспелова Л.Я., Хохлов М.А. Вычислительный центр РАН.) Система ЭКОМОД поддерживает в работоспособном состоянии ранее разработанные модели экономики и помогает использовать их отдельные элементы при создании новых моделей.

Прикладные системы GAMS и GEMPACK ориентированы на проведение численных экспериментов с алгебраическими моделями, в частности - вычислимыми моделями общего равновесия. Они предоставляют в распоряжение пользователю определенный язык записи моделей, инструменты численного решения систем уравнений, записанных на этом языке, а также различные возможности визуализации и анализа полученных решений.

1.3 Обзор модельно-компьютерного инструментария «Регион»

При построении сложных междисциплинарных моделей, в ситуации, когда недостаточно статистических данных о динамике всех исследуемых в модели процессах, особое внимание следует уделить моделям типа «Регион» [15; 20]. В отличие от большинства других моделей они:

1. рассматривают взаимодействие природы, экономики, социума и заболеваемости населения в рамках единой системы;
2. содержат управляющие переменные, что позволяет организовать процедуру многовариантного сценарного анализа;

3. имеют разработанный методологический аппарат, включающий, в том числе, методы получения необходимой в процессе создания модели информации и конкретные методики определения параметров модели.

Именно подходы, применяемые при построении модельного комплекса «Регион», являлись основой для предлагаемой технологии формирования медико-эколого-экономических моделей.

1.3.1 Комплекс эколого-экономических моделей «Регион»

Модельный комплекс состоит из моделей, рассматриваемых на трех уровнях. Модель верхнего уровня позволяет проводить всесторонний анализ крупных экономических проблем и проектов с учетом их воздействия на систему экологических и социальных показателей. К таким проблемам можно отнести переориентацию капитальных вложений, внедрение новых ресурсосберегающих технологий, выделение приоритетных направлений развития, выработка перспективной инвестиционной политики и др. Все разнообразные процессы, происходящие в природно-экономической системе, сведены в модели верхнего уровня к следующим категориям: рост производства, потребление продуктов, межрайонный обмен, самовосстановление и искусственное восстановление природных ресурсов, их взаимное влияние, повышение затрат при ухудшении состояния окружающей среды и ресурсов.

Вместе с тем модели верхнего уровня содержат сравнительно небольшое число агрегированных показателей, поэтому для интерпретации полученных решений, решения локальных задач, связанных с отдельными видами ресурсов, природных и хозяйственных объектов, разрабатываются модели второго уровня: модели компонент природной среды, демографические и состояния здоровья населения. На следующих уровнях находятся расширяющий комплекс частных моделей и модели, того или

иного уникального объекта, имеющего практическую значимость в каждом регионе. Построенный таким образом комплекс моделей, рассматривается как основа системы поддержки стратегических управленческих решений, отвечающих современной парадигме устойчивого развития.

Математическая запись модели верхнего уровня.

Уравнение баланса для продукций n отраслей в регионе.

$$v = Av + Bu + A^{(z)}z + B^{(z)}w + p. \quad (1.11)$$

Уравнение динамики k показателей состояния природной среды.

$$\dot{R} = Q(R - R^*) - Cv - Du - Fp - D^{(z)}w - F^{(L)}L + Jz - R^v + R^u. \quad (1.12)$$

Уравнения динамики фондов.

$$\dot{\Phi} = \beta u - \Delta \Phi, \quad (1.13)$$

$$\dot{\Phi}^{(z)} = \beta^{(z)}w - \Delta^{(z)}\Phi^{(z)}, \quad (1.14)$$

$$0 \leq v \leq V(\Phi), \quad (1.15)$$

$$0 \leq z \leq Z(\Phi^{(z)}) \quad (1.16)$$

Ограничения на трудовые ресурсы.

$$\lambda'v + \mu'u + \lambda^{(z)'}z + \mu^{(z)'}w \leq \beta^{(L)}L. \quad (1.17)$$

Приведем далее описание переменных и параметров модели верхнего уровня (1.11) – (1.17), более подробно описанные в [19]:

$v(t)$ – вектор выпуска продукции по всем технологиям в момент времени t ;

$V(t)$ – вектор производственных мощностей;

$z(t)$ – вектор интенсивностей восстановления ресурсов;

$Z(\Phi^{(z)})$ – вектор мощностей отраслей, занимающихся природо-восстановительной деятельностью;

$u(t), w(t)$ – скорости изменения мощностей V и Z ;

$p(t)$ – вектор конечного потребления;

$R(t)$ – вектор показателей состояния ресурсов и природы;

R^* – вектор невозмущенного состояния для $R(t)$;

$L(t)$ – численность населения;

R^3, R^n – потоки природных ресурсов из/в исследуемый регион;

$A, B, A^{(z)}, B^{(z)}, Q, C, D, F, D^{(z)}, F^{(L)}, J, \beta, \Delta, \beta^{(z)}, \Delta^{(z)}, \lambda, \mu, \lambda^{(z)}, \mu^{(z)}, \beta^{(L)}$ – соответствующие матрицы и вектора параметров модели.

В модели верхнего уровня математические соотношения описываются линейными функциями. Уравнение, описывающее динамику показателей природной среды, отличается от балансовых уравнений экономики. По существу, оно описывает природную среду региона в терминах отклонения от некоторого невозмущенного (естественного) состояния R^* . Гипотеза, заложенная в модель, заключается в том, что при отсутствии возмущений природная среда самостоятельно восстанавливается до своего естественного состояния.

Изменение технологических схем производства, условий добычи и разведки полезных ископаемых, повышение производительности труда и другие факторы, влияющие на удельные затраты продукции и ресурсов, учитываются в модели введением зависимости матриц $A, B, C, D, A^{(z)}, B^{(z)}, F^{(L)}, \lambda, \lambda^{(z)}$ от времени. В общем случае матрицы $A, B, C, D, A^{(z)}, B^{(z)}$ могут зависеть также и от R . Зависимость $Q(R)$ учитывает тот факт, что при сильных нарушениях природной среды последняя может потерять способность к самовосстановлению.

Модели второго уровня. Каждая из моделей второго уровня охватывает более широкий, чем в моделях первого (верхнего) уровня, спектр показателей состояния, оставаясь по своей структуре близкой к модели первого уровня. Рассмотрим переход от моделей первого уровня к моделям второго уровня на примере модели природной среды. В результате такого перехода часть элементов модели верхнего уровня входит в модель второго уровня, и некоторая информация из нее напрямую используется при расчете коэффициентов модели второго уровня. Значения показателей модели второго уровня в этом случае можно считать как дезагрегацию показателя модели верхнего уровня.

В модели второго уровня вводится вектор $R_k = (R_k^1, R_k^2, \dots, R_k^n)^T$ – вектор показателей состояния k -го компонента природной среды. Уравнение, описывающее его динамику, имеет вид:

$$\frac{dR_k}{dt} = Q_k (R_k - R_k^*) - (C_k y + D_k u) - F_k^L L + N_k (r - r^*), \quad (1.18)$$

где R_k^* – вектор естественного состояния модели второго уровня; Q_k – матрица самовосстановления и взаимовлияния показателей модели второго уровня; C_k – матрица влияния промышленности; D_k – матрица фондообразующих затрат; F_k^L – вектор влияния населения; N_k – матрица влияния показателей модели верхнего уровня. Так, например, элемент q_{ij} матрицы Q_k характеризует влияние j -го показателя в наборе характеристик k -го компонента природной среды на естественное изменение i -го. Элемент c_{ij} матрицы C_k показывает затраты (уменьшение) i –го показателя, приходящиеся на единицу выпуска продукта j –й отрасли. Остальные переменные r, r^*, y, u, L – переменные модели верхнего уровня.

Последнее слагаемое в уравнении динамики k -го компонента природной среды описывает влияние на показатели k -го компонента природной среды других компонентов. Как видно из этого уравнения, влияние описывается лишь посредством переменных верхнего уровня. Такой подход позволяет значительно сократить количество коэффициентов, подлежащих определению при построении моделей второго уровня.

1.3.2 Пакет прикладных программ «Регион»

На протяжении многих лет (1975-1990) междисциплинарный научный коллектив, объединенный комплексной программой СО РАН и Минвуза РСФСР «Регион», выполнял исследование взаимодействия экономических и экологических систем. Эта работа подробно освещается в следующих монографиях [15,20]. В рамках этого исследования велась работа по

созданию пакета прикладных программ (ППП) «Регион» для проведения эколого-экономических расчетов.

В результате было разработано два варианта ППП «Регион». В первом варианте предполагалось создание пакета на основании предложенной концепции единого программного комплекса системы эколого-экономических расчетов (СЭЭР). Согласно этой концепции, имеющиеся эколого-экономические модели и специфические вычислительные методы для проведения вычислительных экспериментов объединяются в единую систему. Во втором варианте от идеи совмещения в рамках одного ППП моделей, вычислительных методов и разнородной информации отказались. В этом случае модели используются только автономно (как отдельные программы), а из программного сервиса остались только средства подготовки сценариев и анализа результатов вариантных расчетов для комплекса моделей ПЭМ1 – ПЭМ2.

Для отличия этих двух вариантов будем называть второй вариант – программный комплекс (ПК) «Регион». Основной причиной разработки ПК «Регион» являлось то, что первый вариант был построен на основе SARMA, а он в свою очередь не поддерживался системным матобеспечением ИрВЦ после изменения его конфигурации в 1989 году.

Рассмотрим более подробно назначение и состав ППП «Регион». Прежде всего, необходимо отметить, что подробная информация, особенно технические подробности реализации, представлена в серии отчетов «Разработка пакета прикладных программ для проведения эколого-экономических расчетов» за 1986-1990 годы. ППП «Регион» разработан для ЭВМ ЕС с операционной системой ОС ЕС. На рисунке 1.2 представлены подсистемы ППП «Регион». Все подсистемы реализуются на основе стандартных средств ОС ЕС, ИНЕС и SARMA.

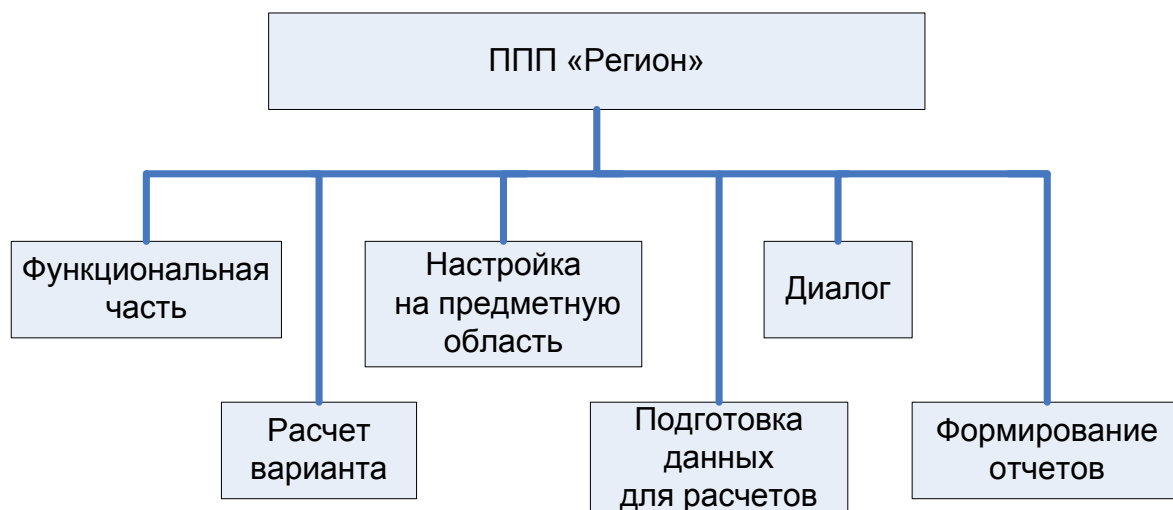


Рисунок 1.2 – Подсистемы ППП «Регион»

В ППП «Регион» различают два способа организации функциональной части: неавтономное и автономное включение функциональных программ (ФП). При неавтономном включении в ФП используются языковые средства SARMA для обмена данными с БД. В случае автономного включения данные ФП хранятся в наборе данных ОС ЕС, и имеется специальный адаптер, который конвертирует их в форму представления БД SARMA. Функциональная часть включает программы ПЭМ1 и ПЭМ2, реализующие расчеты систем ОДУ задающие эколого-экономические модели первого и второго уровня; расширяемый блок специальных программ ввода (БСП1), осуществляющих подготовку данных для расчетов на конкретной модели; расширяемый блок специальных программ ввода (БСП2) осуществляющих формирование и вывод отчетных форм по результатам расчетов.

Универсальные схемы хранения данных в БД «SARMA» требуют настройки на предметную область (ПО). Для этого достаточно определенным образом зафиксировать в БД структуру пространств фазовых и управляющих переменных рассматриваемых моделей [20]. Процедуры настройки на предметную область означает, что помимо ввода массивов данных в БД заносится и информация, необходимая для содержательной интерпретации этих данных. При этом также с тем формируется словарь терминов для организации диалога с пользователем в предметных терминах.

По запросу пользователя может быть вызван на расчет любой сценарий, хранящийся в БД «САРМА». После или в ходе выполнения ФП результаты расчетов заносятся в БД и привязываются там к рассматриваемому сценарию. Параметры моделей и расчетные данные могут вводиться в БД как в диалоговом, так и в пакетном режимах. При этом система автоматически генерирует формы ввода. В системе предусмотрено два типа диалога: вопрос-ответ и заполнение таблиц. Вывод информации вычислительных экспериментов осуществляется в диалоговом режиме в виде таблиц и графиков.

ПК «Регион» в отличие от ППП «Регион» построен на базе комплекса только автономных ФП, осуществляющих формирование сценариев, прогнозные расчеты, сравнение и оценку сценариев, вывод разнообразной информации в удобной для пользователя виде (таблицы, графики, карты, диаграммы), а также другие расчеты. Выбор сценария и программ, выполняющих вычисления, передача этим ФП наборов данных осуществляется в ходе основного диалога в форме меню, который ведет программа RGN. Она решает следующие задачи:

- 1) соединение в единый комплекс ФП, выполненных независимо друг от друга;
- 2) обеспечение требуемой последовательности вызова и выполнения ФП;
- 3) обеспечение диалогового взаимодействия с пользователем.

Для выполнения сервисных работ по обслуживанию системных наборов данных программы RGN в ПК «Регион» имеется вспомогательная организующая программа SERV. Программа предоставляет средства для формирования и корректировки банка расчетных сценариев, каталога функциональных программ и сценария основного диалога. Программы RGN и SERV написаны на языке PL-I.

ППП «Регион» использовалась для подготовки расчетов по предложениям Госплану СССР по Генеральной концепции развития производственных сил и территорий комплексной схемы охраны природы

(ТЕРСКОП) бассейна озера Байкал. Результаты расчетов, полученные при помощи ПК «Регион» вошли в монографию [20].

1.4 Выводы по обзору

В настоящее время существуют достаточно большое количество исследований, связанных с разработкой и изучением моделей взаимодействия отдельных компонент медико-эколого-экономических системы. При разработке таких моделей используется разнообразный математический аппарат: регрессионные, алгебраические, дифференциальные уравнения и их комбинации. Проведенный обзор научных работ показал, что наиболее распространенным классом математических моделей, применяемых специалистами-предметниками, являются эконометрические модели.

По мере накопления опыта в создании моделей, описывающих взаимодействие отдельных компонент, особый интерес представляет собой построение комплексных моделей, учитывающих взаимодействие экономического, экологического и медицинского блока на уровне таких показателей как выпуски по отраслям хозяйства, загрязнение природной среды региона и обращаемость населения за медицинской помощью.

К одним из таких комплексных моделей относятся модели типа «Регион», представляющие собой расширение динамических балансовых моделей, в которых социум, природа и экономика описываются как равноправные составляющие. Модели типа «Регион» выгодно отличаются от других комплексных моделей тем, что имеют разработанный методологический аппарат, включающий, методы получения необходимой в процессе создания модели информации и конкретные методики определения параметров модели.

Разработанное и представленное в диссертации математическое, алгоритмическое и программное обеспечение является естественным продолжением работ по автоматизации процесса поддержки исследования медико-эколого-экономических систем, проводимых на основе модельно-компьютерного инструментария «Регион». Основными отличиями являются: явное использование знаний через использование экспертной системы и системы представления и извлечения знаний; модификация идентификационных методик с использованием знаний (моделирование идеализированных экспериментов); апробация подхода к предметным областям, связанным со здоровьем населения; реализация программной системы на основе новых информационных технологий, что создает возможность интеграции и дальнейшего развития программного комплекса в современные программно-аппаратные средства (РС, Интернет).

2 МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И АНАЛИЗ СИСТЕМ НА ОСНОВЕ ИДЕАЛИЗИРОВАННОГО ЭКСПЕРИМЕНТА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЭКСПЕРТНОЙ ИНФОРМАЦИИ

2.1 Информационные проблемы моделирования динамических систем и вычислительный эксперимент

2.1.1 Проблема дефицита информации при построении моделей динамических систем

Различные методы идентификации в классической теории [17] предполагают определенную избыточность информации об объекте, выраженную в терминах его реакций как «черного ящика» на различные воздействия, либо возможность многократного экспериментирования с объектом для различных начальных условий, внешних воздействий, значений случайных факторов. Такая информационная ситуация наблюдается во многих технических системах и процессах.

Специфика рассматриваемого в диссертации класса динамических систем заключается в том, что получение достаточной для идентификации модели информации в результате наблюдения за системой или специально организованных экспериментов, обеспечивающих необходимое разнообразие ситуаций, невозможно. Указанная особенность систем приводит к проблемам в использовании методов идентификации, традиционно применяемых для исследования технических и физических объектов.

Для решения описанной информационной проблемы необходимо представить объект моделирования как систему сравнительно однообразных взаимодействующих частей различной природы, каждая из которых относится к некоторой предметной области. Следовательно, успех исследования будет зависеть от степени изученности как отдельных подсистем, так и их взаимодействия. При этом следует учитывать, что связей между подсистемами, как правило, больше, чем самих подсистем, а число

связей измеряется, примерно числом сочетаний этих составных частей системы. Кроме того, сами связи нельзя непосредственно отнести к той или иной предметной области. В итоге даже, если существует информация о каждом конкретном составном элементе многокомпонентной системы, этого оказывается недостаточно, по сравнению с информацией, необходимой для описания взаимодействия элементов во всевозможных комбинациях. Пример подобной проблемы информационного обеспечения математического моделирования приведен в [51] и представлен в таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Блоки социо-эколого-экономической системы и взаимодействие между ними

	С	Э	П	И
С	СС	СЭ	СП	СИ
Э	ЭС	ЭЭ	ЭП	ЭИ
П	ПС	ПЭ	ПП	
И				ИИ
У	УС	УЭ	УП	УИ

В таблице 2.1 рассматриваются основные блоки социо-эколого-экономической модели и их взаимодействие: С – социальный; Э – экономический; П – природный; И – блок научно-технического прогресса; У – управляющие воздействия. Для социо-эколого-экономических систем характерна следующая информационная картина: больше всего данных существует для экономического блока (ЭЭ); также имеется информация о природном (ПП) и социальном (СС) блоках; для других блоков и связей необходимой информации недостаточно.

С проблемой дефицита информации также связана проблема выбора структуры математической модели. С информационной точки зрения при идентификации линейных моделей требуется меньше данных по сравнению с нелинейными.

Пусть модель динамической системы описывается скалярной линейной функцией n переменных $y = a + b^T x = a + \sum_{i=1}^n b_i x^i$. Тогда для идентификации модели потребуется определить $n+1$ параметр. В то же время немного более сложная модель, описываемая линейно-квадратичной функцией $y = a + \sum_{i=1}^n b_i x^i + \sum_{i \geq j} c_{ij} x_i x_j$, потребует дополнительного определения параметров c_{ij} , число которых равно числу сочетаний из n по 2. При возрастании n потребность в информации в случае линейной структуры будет значительно меньше по сравнению с нелинейными вариантами.

В заключении раздела можно сделать вывод, что проблема дефицита информации неизбежно возникает при междисциплинарном подходе в изучении многокомпонентных динамических систем.

2.1.2 Математическая модель динамической системы и ее линеаризация

Основной проблемой при определении структуры математической модели многокомпонентной системы являются неизвестные взаимодействия между подсистемами. Для отдельных подсистем с помощью специалиста-предметника еще можно указать подробную математическую модель, учитывающую предметную специфику. Однако в общем случае для всей системы в целом это сделать проблематично. Тогда при выборе структуры модели необходимо исходить не из содержательных, а из методических соображений, связанных с междисциплинарной спецификой многокомпонентных систем.

Линейные схемы расчетов и рассуждений позволяют достаточно полно отразить качественные взаимодействия составных частей многокомпонентной систем. Линейные модели широко распространены среди специалистов-предметников, более привычны и понятны им, так как используют достаточно общие и очевидные гипотезы. Не случайно, что

традиционные методы экономической науки и экономико-математические методы в большинстве своем линейны (например, некоторые такие модели описаны в аналитическом обзоре диссертации). Существенное значение имеет и возможность применения для анализа линейных моделей эффективного математического аппарата.

Если к перечисленным особенностям линейных схем добавить описанную выше проблему дефицита информации, то рассмотрение линейных моделей систем представляется обоснованным подходом в случае проведения междисциплинарных исследований.

Для получения линейного варианта модели динамической системы по аналогии с рассуждениями из [19] рассмотрим объект, который может быть описан автономной динамической системой с неизвестной правой частью:

$$\dot{x} = f(x, u), \quad (2.1)$$

где x – вектор состояния; u – вектор внешних возмущений, функция $f(\cdot)$ – непрерывна и дифференцируема в точке $(\bar{x}, \bar{u})$.

В рассматриваемой точке $(\bar{x}, \bar{u})$ ситуация $\bar{u} = 0$ соответствует отсутствию внешних воздействий на данную подсистему либо на систему в целом, в состав которой она входит, $\bar{x}$ – решение уравнения

$$f(x, \bar{u}) = 0, \quad (2.2)$$

соответствует состоянию равновесия системы при отсутствии внешних воздействий.

Предполагается, что состояние $(\bar{x}, \bar{u})$ известно независимо от модели из некоторой совокупности наблюдений над системой. Отсутствие внешних воздействий может соответствовать некоторой константе $\bar{u} = const \neq 0$ и зависит от выбора системы отсчета.

Также предполагается, что состояние $(\bar{x}, \bar{u})$ устойчиво, т.е. движение системы без возмущений будет происходить вблизи равновесия при достаточно малых отклонениях начального состояния от $(\bar{x}, \bar{u})$. Кроме того,

пусть в течение исследуемого периода времени внешние воздействия достаточно малы, так что движение системы также будет происходить вблизи состояния равновесия, а при их прекращении будет устойчивым.

Приведенные выше допущения соответствуют ситуациям характерным для многих типов многокомпонентных динамических систем, например, природным или медико-экологическим. Методики исследований таких систем, используемые специалистами-предметниками, очень часто направлены на наблюдения и оценку «фона», который является основой для анализа возможных изменений системы за счет рассмотрения различных вариантов воздействий. Примерами такого «фоновое уровня» показателей модели могут быть средний годовой уровень обращаемости населения за медицинской помощью или средний запас древесины на гектаре, над которыми велись наблюдения до возникновения воздействий (загрязнения, вырубки и др.).

Сопоставим системе (2.1) линейную стационарную систему

$$\dot{x} = A(x - \bar{x}) + B(u - \bar{u}), \quad x \in R^n, \quad u \in R^k, \quad (2.3)$$

где $A = f_x(\bar{x}, \bar{u}) = [a_{ij}] = [f_{x^j}^i]$, $B = f_u(\bar{x}, \bar{u}) = [b_{ik}] = [f_{u^k}^i]$.

Новое соотношение (2.3) помогает установить связь этой линеаризованной модели с исследуемой системой, первичным описанием которой была абстрактная модель (2.1) с неизвестной правой частью. При этом никакой количественной информации новые выражения в себе не несут, так как конкретная система (2.3) также не известна.

Величины a_{ij} , b_{ik} характеризуют чувствительность системы к изменениям показателей состояния и внешних воздействий относительно равновесия. Эти величины показывают, насколько изменится в единицу времени показатель x_i при изменении, соответственно, только показателя x_j или u_k на единицу (если единицы измерения времени выбраны малыми, в пределах возмущений).

Как отмечается в [19], такая содержательная интерпретация величин a_{ij} , b_{ik} позволяет задавать процедуры определения их значений посредством

описания воображаемого физического опыта, т.е. некоторого эксперимента. Подобные эксперименты должны проводиться целенаправленно, по определенной схеме, которая диктуется принятой структурой модели. Например, можно рассмотреть эксперимент, в котором все показатели, кроме одного (x_j или u_k) задаются в какой-то момент равновесными, один отклоняется и через промежуток времени Δt измеряется значение показателя. Более подробно конкретные варианты экспериментов представлены в разделе 2.1.3.

2.1.3 Концепция идеализированного эксперимента, экспертные знания и вычислительный эксперимент

Как было показано выше, междисциплинарная специфика многокомпонентных систем оказывает существенное влияние на процесс их изучения. Математическая модель становится основным объединяющим средством при организации совместной работы экспертов и определяет методики междисциплинарного исследования, которые можно обобщить в понятии «абстрактный эксперимент».

Под абстрактным экспериментом понимается любая процедура, позволяющая восстановить искомый оператор. Это может быть реальный эксперимент (в узком смысле этого слова); наблюдение в некоторых естественных условиях, приближающихся к требуемым условиям эксперимента; анализ литературных данных по определенной системе, вытекающей из заданных требований. Комплекс мероприятий, связанных с получением необходимой информации для реализации абстрактного эксперимента и определения конкретных коэффициентов взаимодействия между отдельными компонентами моделируемого объекта называется *идеализированным экспериментом* [19].

Методика проведения идеализированного эксперимента описывает последовательность действий с целью создания модели (не обязательно

математической), позволяющей имитировать поведение системы или ее отдельных компонентов при заданных условиях, не прибегая к проведению эксперимента над всей системой и обеспечивая сохранение внешних условий, близких к естественным; а также определяет:

- 1) схему формирования требуемых начальных и текущих условий эксперимента и контроля динамики системы или ее компонентов в течение заданного промежутка времени;
- 2) условия проведения эксперимента с моделью (в т.ч. его продолжительность);
- 3) схему расчета требуемых параметров.

В качестве модели, имитирующей поведение отдельных компонентов системы, могут быть использованы:

- 1) математическая модель, более детально описывающая поведение компонента;
- 2) набор расчетных формул, позволяющих определить данный коэффициент на основании его содержательной интерпретации;
- 3) экспериментальная установка;
- 4) экспертная система.

В диссертационной работе особое внимание уделяется проблемам применения некоторых типов идеализированного эксперимента (раздел 2.3).

Информацию, используемую в идеализированных экспериментах, можно разделить на данные и знания. Данные могут быть получены на основе наблюдений или в результате натурных экспериментов. Необходимые экспертные знания о закономерностях описываемых систем можно получить, проведя анализ имеющейся научной литературы. Можно также попытаться получить знания непосредственно от экспертов в ходе специально организованных интервью, опросов и т.п. Содержательный смысл вопросов будет соответствовать конкретному идеализированному эксперименту.

В результате работы по извлечению знаний удастся сформировать информационно-логическую модель, в которой содержится описание

предметных областей с точки зрения экспертов-предметников. В диссертационной работе она называется «Логическое описание предметной области» и более подробно описывается в разделе 3.1.

Решение проблем, связанных с обработкой больших объемов разнородной информации, участием в исследованиях специалистов разного профиля, разнообразием моделей и методик их идентификации, невозможно осуществить без использования вычислительного эксперимента. Под **вычислительным экспериментом** понимается методология исследования сложных научных проблем, основанная на построении и анализе с помощью ЭВМ математических моделей изучаемых объектов. В монографии [60] выделяются следующие основные этапы вычислительного эксперимента: 1) построение математической модели; 2) разработка вычислительного алгоритма; 3) создание программы на ЭВМ; 4) проведение расчетов; 5) обработка результатов. Вычислительные эксперименты являются основным инструментом исследования и используются на всем процессе формирования математических моделей динамических систем: на этапе определения параметров модели; верификации модели; на этапе сценарного анализа.

На этапе определения параметров при реализации различных типов идеализированных экспериментов необходимы вычисления по специальным расчетным формулам, а также подготовка для них соответствующих данных, получаемых с использованием статистических данных и экспертных знаний.

На этапе верификации вычислительный эксперимент используется для определения соответствия поведения модели гипотезам, заложенным в нее специалистами-предметниками и математиками. Для этого проводятся тестовые расчеты со специально сформированными сценариями. Например, описанное выше свойство устойчивости состояния $(\bar{x}, \bar{u})$ применительно к модели динамики заболеваемости населения (раздел 4.1.) описывается следующим сценарием: при отсутствии загрязнений показатели здоровья приближаются к «естественному» уровню, характерному для населения

экологически благополучных территорий со средним (и выше) уровнем медицинского обслуживания, за период самовосстановления.

2.2 Общий алгоритм построения математической модели динамической системы

Для реализации процесса формирования и исследования математических моделей многокомпонентной динамических систем предлагается *алгоритм* для определения их структуры и параметров, основанный на линейных аппроксимациях, идеализированном эксперименте и экспертных оценках..

1. Определение общей номенклатуры показателей x , u абстрактной динамической модели $\dot{x} = f(x, u)$.
2. Формирование множества опорных точек $(\bar{x}, \bar{u})$.
3. Выбор опорной точки $(\bar{x}, \bar{u})$.
4. Линеаризация динамической модели в форме (2.3).
5. Формирование множеств параметров линеаризованной модели и их содержательной интерпретации:

$$P_A = \{(a_{ij}, p_{ij}^a), i = 1, \dots, n; j = 1, \dots, n\}, \quad (2.4)$$

где $P_B = \{(b_{ik}, p_{ik}^b), i = 1, \dots, n; k = 1, \dots, m\}$, p_{ij}^a и p_{ik}^b – содержательная информация, связанная с некоторым параметром модели a_{ij} или b_{ik} соответственно.

6. Выделение компонент системы и определение соответствующих подмножеств: $J' \subset J$, $K' \subset K$ и P_A', P_B' .

7. Формирование идеализирующих допущений для имитации взаимодействий между компонентами.

8. Построение специальной модели M , удовлетворяющей введенным в п. 7 условиям и имитирующей взаимодействия между

отдельными компонентами, соответствующими выбранным индексам J' и K' :

$$M(a_{ij}, b_{ik}, \bar{x}_i, \bar{u}_k, q_z, X_i, X_j, U_k), \quad (2.5)$$

где $i, j \in J' \subset J$, $k \in K' \subset K$, q_z – неизвестные параметры новой модели M (например, коэффициенты значимости оценок экспертов), X_i, X_j, U_k – оценка значений x_i, x_j, u_k соответственно. При дальнейшем изложении, чтобы отличать различные специальные модели, в конкретных случаях к букве M будут добавляться верхние и нижние индексы.

9. Определение q_z, X_i, X_j, U_k для модели M .

10. Определение параметров из множеств P_A и P_B' на основе идентифицированной специальной модели M .

В процессе исследования может быть изменена опорная точка $(\bar{x}, \bar{u})$ (шаг 3), выбраны другие наборы компонент системы (шаг 6) и идеализирующие допущения (шаг 7) и сформированы разные частные модели (шаг 8). Таким образом, получается итеративная процедура последовательного исследования системы. В зависимости от конкретного вида допущений и способа получения модели M выделяются два типа идеализированных экспериментов: компонентные эксперименты и тиражирование.

В зависимости от конкретного вида допущений и способа получения модели M выделяются два типа идеализированных экспериментов: компонентные эксперименты и тиражирование, рассмотренные в следующем разделе.

2.3 Способы идентификации, их модификации и процедуры применения

Как отмечается в предыдущих разделах, для параметрической идентификации применяется схема оценки параметров, которая основана на

наблюдении не всей системы, а на исследовании взаимодействия ее подсистем. Схема идентификации в этом случае основана на наблюдении не множества реализаций поведения динамического объекта в целом, а на экспериментах с отдельными его элементами, с которыми связаны те или иные параметры или группы параметров модели.

2.3.1 Компонентные эксперименты

Постановка компонентного эксперимента приведена в [19]. Рассматривается линейная стационарная система:

$$\dot{x} = A(x - \bar{x}) + B(u - \bar{u}). \quad (2.6)$$

Зафиксируем каким-то образом показатели, кроме одного - x_i , $x_i \neq \bar{x}_i$, $x_j \neq \bar{x}_j$, $j \neq i$, $u_k \neq \bar{u}_k$ и x_i отклоним $\bar{x}_i$ на некоторую малую величину. В результате будем наблюдать изменения только одной величины - x_i . Это означает, что вместо исходного моделируемого объекта в результате наложения указанной связи мы получим некоторый новый объект, в определенном смысле более простой, и соответствующую ему модель $\dot{x}_i = a_{ii}(x_i - \bar{x}_i)$. Измерив x_i в начальный и конечный момент (момент отклонения) и в некоторый другой момент t_k , получим необходимые данные для определения a_{ii} :

$$a_{ii} = \frac{1}{t_k - t_n} \ln \left| \frac{x_i(t_k) - \bar{x}_i}{x_i(t_n) - \bar{x}_i} \right|. \quad (2.7)$$

Такой эксперимент называется однокомпонентным. Таким образом, можно получить все диагональные элементы a_{ii} матрицы A . После этого следует серия экспериментов по определению внедиагональных элементов матрицы A и всех элементов матрицы B . Фиксируются в равновесии все показатели, кроме двух: x_i и x_j или u_k . Значения x_i отклоняются от равновесного в момент t_n , значения x_j или u_k также отклоняются и

поддерживаются постоянными во все время эксперимента $t_k - t_n$. В результате получается уже другой объект с другой моделью:

$$\dot{x}_i = a_{ii}(x_i - \bar{x}_i) + a_{ij}(x_j - \bar{x}_j), \quad (2.8)$$

$$\dot{x}_i = a_{ii}(x_i - \bar{x}_i) + b_{ik}(u_k - \bar{u}_k). \quad (2.9)$$

Отсюда по измерения x_i в два момента времени определяются значения a_{ij} или b_{ik} по формулам:

$$a_{ij} = a_{ii} \frac{x_i(t_k) - \bar{x}_i - e^{a_{ii}(t_k - t_n)}[x_i(t_n) - \bar{x}_i]}{(x_j(t_k) - \bar{x}_j)[\exp(a_{ii}(t_k - t_n)) - 1]}, \quad (2.10)$$

$$b_{ik} = a_{ii} \frac{x_i(t_k) - \bar{x}_i - e^{a_{ii}(t_k - t_n)}[x_i(t_n) - \bar{x}_i]}{(u_k(t_k) - \bar{u}_k)[\exp(a_{ii}(t_k - t_n)) - 1]}. \quad (2.11)$$

Если x_j отклоняется вместе с x_i , но не фиксируется, и производятся измерения обоих показателей в моменты t_n и t_k , то будет иметь место следующая модель:

$$\dot{x}_i = a_{ii}(x_i - \bar{x}_i) + a_{ij}(x_j - \bar{x}_j), \quad (2.12)$$

$$\dot{x}_j = a_{ji}(x_i - \bar{x}_i) + a_{jj}(x_j - \bar{x}_j). \quad (2.13)$$

Такой эксперимент можно назвать двухкомпонентным. Аналогично можно рассматривать многокомпонентный эксперимент, в котором часть показателей фиксируется, а оставшаяся часть отклоняется от своих равновесных значений в некоторый момент времени. В пределе получается обычный идентификационный эксперимент над всеми объектом в целом.

Однокомпонентный эксперимент с учётом взаимовлияния В развитие компонентного эксперимента в диссертации предлагается модифицировать однокомпонентный эксперимент (2.3.1), (2.3.4), (2.3.6), дополнив его гипотезой о том, что показатели x_j ($i \neq j$) по различным причинам не могут быть зафиксированы на уровне $\bar{x}_j$, но их удается удерживать на некотором уровне $\tilde{x}_j$. Тогда для определения коэффициентов матрицы B , используется модифицированный однокомпонентный эксперимент:

$$\dot{x}_i = a_{ii}(x_i - \bar{x}_i) + \sum_{j=1, i \neq j}^n a_{ij}(\tilde{x}_j - \bar{x}_j) + b_{ik}(u_k - \bar{u}_k), \quad (2.14)$$

где u_k – поддерживаемое на постоянном уровне внешнее воздействие,

$\sum_{j=1, i \neq j}^n a_{ij}(\tilde{x}_j - \bar{x}_j)$ – влияние на рассматриваемый i -ый показатель остальных

показателей модели, значения которых поддерживаются на постоянном уровне в течение эксперимента (например, можно рассматривать их среднее арифметическое за период $t_k - t_n$). При выборе уровня $\tilde{x}_j$ учитывается также значение, на которое отклоняется в ходе эксперимента u_k .

Найдём аналитическое представление для b_{ik} :

$$b_{ik} = \frac{a_{ii}(x_i(t_k) - \bar{x}_i - (x_i(t_n) - \bar{x}_i)e^{a_{ii}(t_k - t_n)})}{u_k(e^{a_{ii}(t_1 - t_0)} - 1)} - \frac{\sum_{j=1, i \neq j}^n a_{ij}(\tilde{x}_j - \bar{x}_j)}{u_k}. \quad (2.15)$$

Использование экспертной информации в компонентном эксперименте [23, 62]. При моделировании медико-эколого-экономических систем рассматриваемых в диссертации, чаще всего не имеется возможности постановки специально организованных натурных наблюдений за поведением компонента системы или использования спроектированных физических установок для имитации таких натурных наблюдений.

В то же время существуют эксперты, которые на основании своего опыта и результатов исследований в конкретных предметных областях могут выдвигать предположения о характере поведения исследуемого компонента в различных ситуациях. В случае использования компонентного эксперимента экспертам могут быть представлены конкретные типы ситуаций, задаваемые описанными выше компонентными экспериментами.

Тогда на основе комбинации статистической информации и экспертных знаний о закономерностях поведения компонента модели можно сформировать условия проведения идеализированного эксперимента – поддержание некоторых показателей моделей в невозмущенном состоянии – и смоделировать для него исходные данные.

С учетом рассуждений, приведенных при описании общего алгоритма построения математической модели динамической системы (раздел 2.2) можно сделать вывод, что в результате организации идеализированного эксперимента изучается уже некоторый *новый объект*, и соответствующая ему специальная модель $M_{1x_i}^{(комп)}$ будет иметь вид:

$$\dot{x}_i = a_{ii}(x_i - \bar{x}_i) \quad (2.16).$$

Пусть X_i^H , X_i^K – оценка x_i в условиях эксперимента, которые могут быть заданы как результаты наблюдений за x_i в начальный и конечный момент (t_H и t_K), а в условиях дефицита информации и невозможности проведения активных экспериментов как задаваемые экспертом оценки. В последнем случае, например для X_i^H , имеем:

$$X_i^H = \sum_{l=1}^L \alpha_l^H F_i^l, \quad (2.17)$$

где F_i^l – оценка i -го показателя l -м экспертом, получаемая либо непосредственно из опросов экспертов, либо косвенно из документальных источников; α_l – коэффициент значимости эксперта, причем $\sum_{l=1}^L \alpha_l^H = 1$, $\alpha_l^H \geq 0$; X_i^H – взвешенная количественная оценка. В данном случае в терминах обобщенного алгоритма для $M_{1x_i}^{(комп)}$ имеем $q = \{\alpha_l^H, \alpha_l^K\}$. Тогда для параметра a_{ii} можно получить следующее аналитическое представление:

$$a_{ii} = [1/(t_K - t_H)] \cdot \ln |(X_i^K - \bar{x}_i)/(X_i^H - \bar{x}_i)|. \quad (2.18)$$

Используя этот подход, можно получить все диагональные элементы a_{ii} . Применяя аналогичные рассуждения, на следующем этапе однокомпонентного эксперимента с учетом известных диагональных элементов определяются внедиагональные элементы матрицы A (элементы матрицы B). При этом рассматриваются изменения не только x_i , но и x_j (или u_j), тогда получим специальную модель $M_{1x_j}^{(комп)}$ ($M_{1u_k}^{(комп)}$):

$$\dot{x}_i = a_{ii}(x_i - \bar{x}_i) + a_{ij}(x_j - \bar{x}_j), \quad (2.19)$$

$$\dot{x}_i = a_{ii}(x_i - \bar{x}_i) + b_{ij}(x_j - \bar{u}_k), \quad (2.20)$$

$$a_{ij} = a_{ii}(X_i^\kappa - \bar{x}_i - e^{a_{ii}(t_k - t_n)}[X_i^h - \bar{x}_i]) / ((X_j - \bar{x}_j)[\exp(a_{ii}(t_k - t_n)) - 1]), \quad (2.21)$$

$$b_{ik} = a_{ii}(X_i^\kappa - \bar{x}_i - e^{a_{ii}(t_k - t_n)}[X_i^h - \bar{x}_i]) / (U_k - \bar{u}_k)[\exp(a_{ii}(t_k - t_n)) - 1], \quad (2.22)$$

где X_i^h , X_i^κ , X_j , U_k – взвешенные количественные экспертные оценки, для $M_{1x_j}^{(комп)}$ имеем $q = \{\alpha_{il}^h, \alpha_{il}^\kappa, \alpha_{jl}\}$.

Конкретный пример экспертных оценок приведен в разделе 4.1.2.

2.3.2 Тиражирование моделей

При использовании второго способа идеализированного эксперимента – тиражирования – предполагается, что специальная модель M может быть получена не только как преобразование линейной модели (2.1.3), но и как новая модель, исходя из содержательного смысла определяемых коэффициентов a_{ij} , b_{ik} . Способы определения параметров, задаваемые такими типами специальных моделей, будем называть *предметно-ориентированными методиками*. В этом случае определение параметров осуществляется по формулам, параметры которых основаны на применении статистических данных и различной содержательной информации о функционировании объектов в многокомпонентной системе.

К предметно-ориентированным методикам относятся, например, методики расчета некоторых коэффициентов модели «Регион», описанные в [15; 20] для блоков «Водные ресурсы», «Воздушная среда», «Земельные ресурсы», «Лесные ресурсы», «Минеральные ресурсы», «Биологические ресурсы» и другие подобные методики. Подход к тиражированию моделей рассматривается в работе [23].

Информацию, используемую в предметно-ориентированных методиках, можно разделить на два типа.

1. Данные, характерные для моделируемого объекта (обозначим этот тип SS). Например, численность населения, количество машин у населения, средний пробег, объем приземного слоя атмосферы.

2. Данные и технологические коэффициенты, связанные с содержательным смыслом идентифицируемого параметра в модели. Например, средний расход бензина, удельные выбросы. Обозначим этот тип DS.

На практике при исследовании медико-эколого-экономических систем не всегда можно получить все данные для непосредственного применения некоторой предметно-ориентированной методики. В этом случае, при наличии данных второго типа для идентифицированных моделей или данных первого типа для систем, схожим по тем или иным своим характеристикам, которые оказываются важными для рассматриваемого коэффициента (численность населения, уровень развития отрасли экономики и т.п.), можно определить параметры на основе предметно-ориентированных методик, используя дополнительную информацию из моделей систем, подобных рассматриваемой (базовая модели). Таким образом, основная идея применения предметно-ориентированных методик в условиях дефицита информации заключается в использовании известных значений параметров базовой (контрольной) модели для расчета неизвестных значений параметров формируемой модели. Для этого в диссертации разработан **алгоритм тиражирования**.

Пусть для реализации некоторой предметно-ориентированной методики в условиях дефицита информации используются данные типа SS для исследуемой модели (ИМ) и параметры некоторого аналога базовой модели (БМ), тогда:

1. Для выбранного параметра модели A^{TM} определяется соответствующая ему предметно-ориентированная методика - F.
2. По ведущим характеристикам для F определяется базовая модель.
3. Из базовой модели выбирается известное значение A^{BM} .

4. Определяются соответствующие выбранной F данные из класса SS для текущей и базовой модели: $SS_{k}^{им}$ и $SS_{k}^{бм}$.

5. В зависимости от содержательного смысла вычисляются масштабирующие коэффициенты $M_k = SS_{k}^{им}/SS_{k}^{бм}$ или $M_k = SS_{k}^{бм}/SS_{k}^{им}$.

6. Вычисляется неизвестный параметр по формуле:

$$A^{им} = M_1 * \dots * M_k * A^{бм}. \quad (2.23)$$

Рассмотрим пример использования процедуры тиражирования. Имеется следующая формула определения элементов некой матрицы C, отражающих влияние экономики на загрязнение воды [20]:

$$c_{1i} = \frac{e^{-q_{11}} t_{cp}}{V} \sum_{i=1}^p \frac{m_{ij}}{ПДК_i}, \quad (2.24)$$

$$m_{ij} = \frac{\sum_{k=1}^N m_{ij}^k}{\sum_{k=1}^N v_j^k}, \quad (2.25)$$

$$t_{cp} = \frac{1}{N^j} \sum_{k=1}^{N^j} \frac{s_k^j}{v}, \quad (2.26)$$

где m_{ij}^k – количество примеси i , сброшенной k -м предприятием j -ой отрасли за год (т/год); v_j^k – валовой выпуск k -предприятия j -ой отрасли; v – скорость реки, s_k^j – расстояние от предприятия до устья реки, N^j – количество предприятий, V – объем реки/водоёма. В отсутствии данных о выбросах по конкретным загрязнителям m_i предполагаем, что структура выбросов для отрасли j на единицу производства в базовой модели сохраняется для j -ой отрасли исследуемой модели. Тогда

$$c_{1j}^{new} = \frac{V^{base}}{V^{new}} c_{1j}^{base}, \quad (2.27)$$

где индекс *new* означает принадлежность параметра к исследуемой модели, а индекс *base* – к базовой модели.

При тиражировании параметра желательно выбирать такой аналог исследуемой системы, где сходны технологические, климатические,

социальные условия. Другие примеры тиражирования рассмотрены в главе, посвященной вычислительным экспериментам (раздел 4.3.2).

2.3.3 Идентификация по серии экспериментов

Пусть математическая модель управляемого объекта на периоде $T = [t_0, t_1]$ описывается системой

$$\frac{dx}{dt} = f(t, x(t), u(t), a), \quad (2.28)$$

где $t \in T$, функция $x(t)$ кусочно-дифференцируема и принимает значение в евклидовом пространстве R^n ; $u(t) \in R^m$ - кусочно-непрерывная; a - векторный параметр из R^r .

Наблюдения за объектом ведутся на некоторых отрезках времени $T^i = [t_0^i, t_1^i] \subset T$, $i = \overline{1, p}$. На каждом отрезке времени T^i известна вектор-функция $g^i(t, x, u, a)$, описывающая математическую модель оператора измерений над объектом (т.е. входной информацией в блок идентификации моделей могут служить не только значения состояния системы, но так же некоторые заранее известные функции состояния, и g^i описывает эти зависимости), заданы вектор начальных состояний $x(t_0^i)$, вектор значений оператора измерений $\bar{g}^i(t)$, а так же математическая модель оператора измерений $G^i(t_1, x, a)$ при $t = t_1$ и вектор его значений $\bar{G}^i$.

Задача идентификации состоит в поиске параметров a такими, чтобы математическая модель (2.28) описывала наилучшим образом поведение объекта, например в смысле минимума функционала

$$\begin{aligned} I(a) = \sum_{i=1}^p [& (G^i(t_1^i, x^i(t_1^i), a) - \bar{G}^i)' \delta^i (G^i(t_1^i, x^i(t_1^i), a) - \bar{G}^i) + \\ & + \int_{t_0^i}^{t_1^i} (g^i(t, x^i(t), u^i(t), a) - \bar{g}^i(t))' \beta^i(t) \times \\ & \times (g^i(t, x^i(t), u^i(t), a) - \bar{g}^i(t)) dt], \end{aligned} \quad (2.29)$$

где $\beta^i(t)$ и δ^i – диагональные, положительно определенные матрицы.

Сформулированная задача является конечномерной задачей оптимизации, так как управления считаются заданными функциям, а найти нужно вектор параметров a . Для поиска решения задачи используются градиентные и квазиньютоновские методы.

3 АЛГОРИТМИЧЕСКОЕ И ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДЛЯ СИСТЕМНОГО АНАЛИЗА МЕДИКО-ЭКОЛОГО-ЭКОНОМИЧЕСКИХ ПРОБЛЕМ РАЗВИТИЯ РЕГИОНА

В третьей главе рассматривается методическое, алгоритмическое и программное обеспечение поэтапного моделирования систем. Разработана методика интерактивного формирования модели, описывающая информационные структуры и последовательность их использования при реализации предложенного в первой главе общего алгоритма построения математической модели динамической системы. С помощью введенных структур осуществляется уточнение понятия формирования моделей. Предлагается архитектура интеллектуального программный комплекс (ИПК) «МЭЭМ».

3.1 Процесс поэтапного формирования модели динамической системы

Разработка математических моделей представляет собой сложную исследовательскую задачу, процесс моделирования во многом зависит от знаний, опыта и интуиции экспертов-предметников и специалистов в области математического моделирования. Поэтому построение моделей является трудоемкой задачей, решение которой не представляется возможным без использования средств *автоматизации* (т.е. применения программных средств, существенно уменьшающих степень участия человека и трудоёмкость выполняемых операций в процессах получения, преобразования, передачи и использования информации) и *интеллектуализации* (т.е. использования систем, решающих интеллектуальные задачи: в данном случае частичное замещение экспертов при принятии решений в процессе моделирования).

В настоящее время существует значительное количество средств автоматизации моделирования, поддерживающие различные парадигмы [13].

Эти средства предоставляют широкие возможности автоматизации при создании компьютерной модели. Но они не приспособлены для интеллектуализации процесса моделирования на этапах разработки концептуальной модели и ее идентификации в условиях дефицита информации. Это проблема является ключевой в диссертационном исследовании, так как предполагается, что для рассматриваемого класса динамических систем априорно неизвестна его математическая модель. В этом случае методологической основой для поддержки исследователей является *общий алгоритм построения математической модели динамической системы*, описанный в разделе 1.2, включающий в себя такие этапы как линеаризацию неизвестной абстрактной динамической модели, ее идентификацию на основе идеализированного (абстрактного) эксперимента и исследование оптимизационных задач.

Для автоматизации и интеллектуализации процесса построения модели, основанного на этом алгоритме, предлагается общая методика поэтапного интерактивного формирования и исследования модели.

Учитывая принятую в системном анализе технологию разработки математических моделей [14, 52], использование предлагаемой схемы должно осуществляться на следующих этапах построения модели:

1. Формирование баз знаний о предметной области и об объектах моделирования.
2. Определение состава эндогенных и экзогенных переменных
3. Выбор математических соотношений для описания взаимодействия переменных моделей.
4. Формирование исходных данных для выбранной структуры модели.
5. Параметрическая идентификация.
6. Верификация модели.
7. Формирование сценариев для проведения расчетов.

Методика задает информационные структуры (раздел 3.1.1) и процедуры их обработки (раздел 3.1.2) для реализации общего алгоритма формирования модели.

3.1.1 Информационно-логические описания

Для того, чтобы появилась возможность интеллектуальной поддержки процесса моделирования, необходимо иметь некоторое формальное представление предметной области моделируемых систем. С этой целью на первых этапах процесса разработки модели осуществляется формализация представлений экспертов и специалистов в области математического моделирования о подходах к моделированию динамических систем.

В диссертации формализация процесса моделирования осуществляется в виде нескольких информационно-логических описаний.

Информационно-логическое описание предметной области (ЛОПО) содержит описание предметной области с точки зрения эксперта-предметника. В ЛОПО знания организованы в виде фреймов. Фрейм – это модель абстрактного образа, минимально возможное описание сущности какого-либо объекта, явления, события, ситуации, процесса. Фреймы традиционно используются в экспертных системах как одна из распространенных форм представления знаний. С помощью фреймов ЛОПО эксперт-предметник описывает основные элементы и отношения в исследуемой системе. При этом не предполагается, что эксперт должен иметь представление о способах построения математической модели.

В ЛОПО базовые элементы системы задаются с помощью фрейма «*фактор*». Фреймы типа «*фактор*» могут быть связаны отношением «наследование», позволяющим описать новый фрейм на основе уже существующего (родительского), при этом свойства родительского фрейма наследуются новым. В процессе исследования с помощью фрейма «*фактор*»

могут быть описаны различные виды заболеваемости населения, отрасли экономики, характеристик природной среды и др.

Причинно-следственные связи в ЛОПО задаются с помощью специального фрейма *«причинно-следственное отношение»*. Например, такое отношение может быть установлено между факторами *«загрязнение атмосферного воздуха»* и *«заболеваемость органов дыхания»*. Описание структуры этого фрейма представлено в таблице 3.1.

Таблица 3.1 – Структура фрейма «причинно-следственное отношение»

Слоты фрейма	Тип слота	Описание
Название	Текст	Название отношения
«Из»	Экземпляр фрейма <i>«фактор»</i>	Идентификатор первого фактора (причинный фактор)
«В»	Экземпляр фрейма <i>«фактор»</i>	Идентификатор второго фактора (фактор следствие)
«Связь»	Экземпляр фрейма <i>«фактор»</i>	Идентификатор функциональной связи, которой подчиняются факторы (такая связь может быть неизвестной)

Слот фрейма *«связь»* представляет собой идентификатор фрейма *«функциональная связь»*. С помощью этого фрейма задается вид математической функции (линейная, квадратичная и т.д.), которой с точки зрения исследователя может быть описана связь между факторами.

Для того, чтобы установить соответствие между *фактором* и единицей его измерения, в ЛОПО используется фрейм *«измерение»*. Другими важными фреймами ЛОПО являются *«ассоциативное отношение»* и *«структурное отношение»*.

Фрейм *«ассоциативное отношение»* используется, когда необходимо показать, что при определенных условиях в исследовании динамических

систем один фактор, и, следовательно, данные, относящиеся к нему, могут быть заменены другим. Например, при использовании процедуры тиражирования некоторые недостающие для проведения параметрической идентификации данные для моделируемого региона могут быть получены через преобразование данных из указанного с помощью этого фрейма контрольного региона.

Фрейм *«структурное отношение»* определяет возможность разбиения фактора на группы. Например, если таким отношением связан фактор «общая заболеваемость» и потомки фактора «возраст» (например, «дети», «подростки», «взрослые»), то заболеваемость населения можно рассматривать по возрастным группам.

После описания основных элементов ЛОПО часто упоминающиеся при описании подходов к формированию моделей термины «предметный смысл» и «содержательная интерпретация» можно рассматривать не только в общепринятом смысле, но и как совокупность факторов и отношений, связанных с интерпретируемым фактором, переменной или параметром математической модели.

Информационно-логическое описание объектов и методов моделирования (ЛООММ) содержит информацию о структуре моделей, принципах их построения и используемых при этом методах. В ЛООММ множество объектов, которые используются в процессе формирования и исследования модели, разделено на 4 группы: множество переменных модели; множество математических соотношений модели; множество методов идентификации параметров модели; множество процедур исследования модели.

3.1.2 Процедуры формирования математической модели

После введения в процесс построения и исследования математических моделей динамических систем описанных выше информационно-логических описаний можно уточнить, что под задачей **формирования** и исследования моделей понимается преобразование формализованных экспертных знаний специалиста-предметника, представленных в информационно-логическом описании предметной области (ЛОПО), в информационно-логическое описание объектов и методов моделирования (ЛООММ) (рисунок 3.1).

Типовые процедуры, возникающие при формировании математических моделей систем для конкретных классов задач, будем называть ***процедурами формирования моделей*** (ПФМ). Под такими процедурами понимаются наборы элементарных операций, традиционно совершаемых специалистом в области математического моделирования и экспертом-предметником на каждом этапе процесса построения модели.

В процессе формирования математической модели могут возникать как Ф-задачи, так и НФ-задачи¹. Поэтому структура ПФМ на абстрактном уровне представляется в виде тройки <ВП, ПП, ПДД>.

¹ **Ф-задачи** – это формализованные задачи. Для решения Ф-задач используют традиционное программирование (обработка числовых данных, алгоритмы, явное задание шагов решения задачи, управление и данные в программе разделены) [Рыбина, 2008, стр. 53].

НФ-задачи – это неформализованные задачи, обладающие одной или несколькими из следующих характеристик: они не могут быть заданы в числовой форме; не существует алгоритмического решения задач; цели не могут быть выражены в терминах точно определенной целевой функции; алгоритмическое решение существует, но его нельзя использовать из-за ограничения ресурсов [59, стр. 53]. Для решения НФ-задач используются продукционные ЭС.

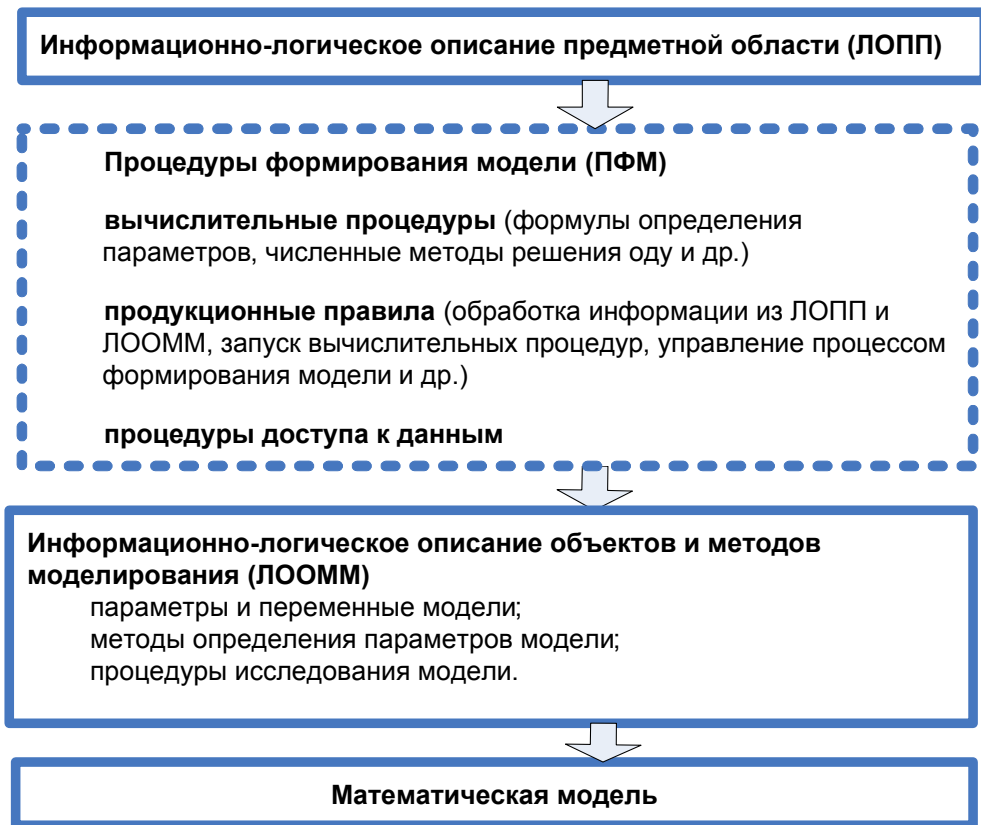


Рисунок 3.1 – Методика формирования модели

Это означает, что для ПФМ разработчик модели в рамках данной схемы построения модели должен предоставить информацию о той вычислительной процедуре (ВП), которую он хочет использовать, определить источники информации, используемые при формировании модели (ПДД), а также задать набор продукционных правил (ПП), которые определяют порядок и условия применимости действий. При этом при реализации ПФМ допускается отсутствие ВП и ПДД, но наличие продукционных правил являются необходимым. Основной задачей ПФМ является выбор необходимых действий для конкретной ситуации в соответствии с поставленной целью.

Рассмотрим составляющие ПФМ более подробно.

Вычислительные процедуры (ВП) – это выполняемые в некоторой моделирующей подсистеме программные процедуры, которые обеспечивают проведение необходимых в процессе формирования модели вычислений. ВП реализуют решение некоторой Ф-задачи. Например, генерация данных на

основе имитационных моделей, определение параметров модели, использование численных методов для решения систем уравнений, задающих модель системы. Множество ВП в рамках данной схемы задается до начала построения конкретной модели и не изменяется в процессе формирования моделей. В главе 3 рассматривается интеллектуальный программный комплекс, в котором существует модуль «Расчет», являющийся моделирующей подсистемой, реализующий необходимые ВП.

Процедуры доступа к данным (ПДД) – это процедуры, обеспечивающие получение необходимой информации в процессе формирования модели из хранилища данных. Хранилище данных может быть организовано в виде базы данных или набора файлов (текстовых, excel, xml и т.п.). Хранилище данных содержит как статистическую информацию, так и данные, использованные ранее при создании других моделей или являющиеся результатами вычислений по этим моделям. Задачей ПДД является преобразование информации из формата хранилища данных в формат, используемый в интеллектуальном программном комплексе (рисунок 3.2).



Рисунок 3.2 – Процедуры доступа к данным

При добавлении нового источника данных в ПДД пользователю необходимо самостоятельно добавить программные процедуры преобразования из формата нового источника в формат интеллектуального программного комплекса.

Предполагается, что ПДД всегда возвращает либо запрашиваемое значение, либо сообщает, что необходимые данные отсутствуют. При

возникновении конфликта при обнаружении нескольких вариантов ответов на запрос берется первый найденный.

Продукционные правила (ПП) – это правила, моделирующие (воспроизводящие) действия разработчиков в процессе построения модели и представимые в форме ЕСЛИ условие, ТО действие.

По осуществляемым действиям в процессе формирования модели продукционные правила можно классифицировать следующим образом.

1. **Составление запросов на создание, модификацию и удаление элементов ЛООММ**, реализованных в некоторой моделирующей системе.

2. **Запуск вычислительных процедур (ВП).**

3. **Сохранение и отражение** в соответствующих базах знаний **результатов выполнения ВП.**

4. **Отслеживание состояния** процесса формирования моделирования (этап, подэтап, задача).

5. **Управление переходами между этапами.** Большинство этапов процесса формирования модели соотносится с классическими этапами построения математической модели. Следовательно, существует определенный порядок выполнения этих этапов. Так, без формирования структуры модели невозможно проводить ее идентификацию, а после проведения верификации может потребоваться переход на предыдущие этапы - для корректировки объектов модели. Таким образом, реализуется итеративный подход к разработке моделей, принятый в математическом моделировании и системном анализе.

6. **Формирование исходной информации этапа.** В эту информацию входят: объекты моделирования, которые должны быть обработаны ПФМ на текущем этапе; предыдущие результаты формирования, актуальные для рассматриваемого этапа.

7. **Формирование целей этапа.**

Обмен информацией между ПФМ и между этапами осуществляется на основе информации о состоянии процесса формирования модели, которая

представляется в следующей структуре <результат, действие, тип, имя, метод>. Данная структура реализована во фрейме «состояние моделирования» (таблица 3.2).

Таблица 3.2 – Структура фрейма «состояние моделирования»

Слоты фрейма	Тип	Примеры возможных значений слота
Результат	Текст	Необходимо, выполнено, принято, отвергнуто
Действие	Текст	Идентифицировать, верифицировать, вычислить, анализировать
Тип	Текст	Матрица, элемент матрицы, фактор, сценарий
Имя (идентификатор)	Экземпляр	
Метод	Список	Однокомпонентный эксперимент, предметно-ориентированная методика

Здесь слот «результат» – это результат выполнения некоторой ПФМ; слот «действие» – класс действия, выполняемого ПФМ; слот «тип» – это тип объекта моделирования, к которому применяется действие. Слот «имя» – уникальное имя (идентификатор) объекта моделирования, позволяющее однозначно получить доступ к объекту на протяжении всего процесса формирования модели. Слот «метод» – список средств моделирования или ПФМ, которые были (или будут) применены к объекту моделирования с идентификатором имя, результат выполнения которых указаны в поле действие.

С каждым этапом формирования модели связано множество ПФМ. Применение ПФМ на каждом этапе осуществляется по следующему алгоритму:

1. Определяется следующий этап на основе информации о состоянии процесса моделирования (если определить следующий этап невозможно, то работа завершается).
2. Формируются условия и цели этапа.

3. Проверяются выполнения условий для осуществления ПФМ.
4. Если возможно, то ПФМ выполняются.
5. Формируются результаты этапа, в зависимости от того, какие решения и действия были приняты, какие условия не удовлетворены.

Для каждой ПФМ желательно задавать варианты действий на перечисленные ниже случаи.

1. Проверка условий применимости ПФМ:
 1. определить текущий этап/подэтап процесса формирования модели;
 2. определить выполнение условий на входные данные;
 3. определить наличие необходимых ВП для выполнения текущей ПФМ.
2. Анализ результатов выполнения ВП и их отражение в БЗ.
3. Проверка выполнимости отложенных ПФМ .
4. Запуск (активация «флагов») других ПФМ с целью обеспечить выполнение текущей ПФМ.

3.2 Многовариантный сценарный анализ

Одним из подходов при изучении стратегий развития региона, отвечающих его особенностям и способствующий достижению основных целей его развития, является многовариантный сценарный анализ. Для проведения серии вычислительных экспериментов требуется сформировать набор входной информации, включающий такие показатели, как валовой выпуск, инвестиции на развитие основных и природоохранных мощностей, интенсивность природоохранных мероприятий и др. Кроме того, должна быть задана коррекция параметров модели из базового набора, отражающая влияние научно-технического прогресса, изменение условий добычи и разведки полезных ископаемых, структурные изменения внутри

агрегированных отраслей и т.п. Вся совокупность входной информации вместе с содержательной ее интерпретацией составляет сценарий развития региона [20]. Для формирования сценариев могут использоваться общие предположения (увеличение или уменьшение переменных моделей); различные содержательные оценки [9] или использование решений задач оптимизации на основе моделей. В последнем случае будем называть сценарий оптимизационным.

3.2.1 Система стандартных сценариев

Источником разнообразных содержательных сценариев могут быть подходы к решению существующих проблем региона. Они в свою очередь определяются программами развития, разработанными как документы в администрации области, города, района; программами реконструкции и развития предприятий; предложениями экспертов. В отличие от такого содержательного подхода процесс разработки системы стандартных сценариев начинается с анализа формальных сценариев для медико-эколого-экономической модели. Под формальным сценарием подразумевается любая заданная комбинация входов математической модели [20, с 21.]. Процесс создания некоторого сценария S определяется следующей последовательностью: S выбирается из множества формальных сценариев; определяется вид изменений в математической модели (таблица 3.3), связанных с S ; в информацию об S добавляется содержательная интерпретация.

Далее рассмотрим описание некоторых наиболее часто используемых в многовариантных расчетах сценариев. Сценарный анализ начинается с разработки базового сценария, который отражает сложившиеся в регионе экономические тенденции. Он разрабатывается на основании текущей

статистической информации и гипотезы о продолжении существующих планов экономического развития.

Таблица 3.3 – Стандартные сценарии

Тип изменения в модели	Экономическая Подсистема	Экологическая подсистема
Пропорциональное изменение величины переменных	Пропорциональный рост	
Не пропорциональное изменение величины переменных	Альтернативное развитие, перераспределение инвестиций	Природоохранный сценарий
Изменение величины параметров	Внедрение инноваций	Ресурсосбережение

Пропорциональный рост. Предполагается, что техническая структура производства и интенсивность природоохранных мероприятий сохранится на современном уровне. Инвестиции обеспечивают одинаковые темпы экономического развития для всех отраслей.

Перераспределение инвестиций. Данный вид сценарий предполагает перераспределение инвестиций из одних отраслей в другие, при этом их суммарный объем в экономике не изменяется.

Альтернативное развитие. Увеличение или уменьшение инвестиций в выбранные отрасли. Например, для Байкальского региона традиционно характерны следующие направления экономического хозяйствования: добыча полезных ископаемых, деревообрабатывающая промышленность, сельское хозяйство, перепрофилирование БЦБК, развития туризма и др.

Природоохранные мероприятия предполагают улучшение экологического состояния региона через непосредственное восстановление ресурсов. В модели это учитывается через слагаемое y , а элементы матрицы

$A^{(y)}(t)$ можно интерпретировать как количество продукта соответствующих отраслей на восстановление единицы ресурсов.

Сценарии внедрения инноваций. В математической модели внедрение новых технологий отражается в изменении параметров, ранее предполагаемых постоянными. В экономической подсистеме, прежде всего, меняются показатели материалоемкости, трудоемкости, фондоемкости, что приводит к корректировке матриц и векторов модели: $A(t)$, l , β .

Сценарии ресурсосбережения предполагают снижение нагрузки на природную среду без существенных изменений в межотраслевой структуре и объемах выпуска продукции. Это может достигаться за счет внедрения новых формы организации производства и применения современных технологий (например, улучшение качества работы очистительных сооружений). В модели это приводит к корректировке матрицы коэффициентов C , отражающей удельные ресурсные затраты при выпуске продукции.

3.2.2 Оптимизационные сценарии

Одним из подходов для реализации оптимизационных сценариев является поиск решений в форме магистралей. Магистральное решение определяет оптимальную траекторию, не зависящее непосредственно от граничных условий. Такая траектория соответствует некоторому желаемому долгосрочному уровню состояния исследуемой сложной системы. Постановка задачи о поиске магистральных решений для задачи оптимального управления, условия существования точных и приближенных решений рассматриваются, например, в [18, 21].

На основе описанных в [21] рассуждений о природе магистральных режимов предлагается следующая методика исследования задач оптимального управления для медико-эколого-экономических систем с применением магистральных решений, состоящая из следующих этапов:

- 1) задание критериев качества для оптимизационного сценария;
- 2) задание необходимых ограничений задачи;
- 3) определение магистралей при идеализированных предположениях;
- 4) аппроксимация магистрального решения с учетом ограничений задачи;
- 5) улучшение полученных решений с использованием известных итерационных методов.

В процессе исследования опорная точка может быть изменена и получено новое приближение модели (2.1.1). Таким образом, получается итеративная процедура последовательного исследования системы. Предлагаемая процедура была протестирована при сценарном анализе медико-эколого-экономических систем и описана в приложении Г.

3.3 Архитектура программного комплекса

Согласно общей методике интерактивного формирования математических моделей динамических систем, программные средства, входящие в интеллектуальный программный комплекс (ИПК) «МЭЭМ» [54], должны на основе знаний о предметной области и принципах моделирования с учетом заданной структуры модели, используя статистические данные наблюдений, в полуавтоматическом режиме сформировать модель и провести многовариантные сценарные расчеты. Для этого в ИПК «МЭЭМ» реализуются следующие функции.

1. Создание и редактирование баз знаний об исследуемом объекте и используемых при его моделировании методах.
2. Редактирование базы знаний: добавление знаний через определение новых фреймов-экземпляров ЛОПО.

3. Определение параметров модели с помощью различных процедур идентификации: автоматизация расчетов, выбор подходящих процедур, моделирование данных на основе экспертных знаний.

4. Формирование различных типов сценариев, проведение многовариантных расчетов.

5. Сохранение полученных результатов моделирования для дальнейшего анализа: база просчитанных сценариев, база построенных моделей, различные виды отображения результатов моделирования.

Современный уровень развития информационных технологий позволяет не создавать программное обеспечение с нуля, а адаптировать уже существующие средства в собственных разработках. Для создания ИПК «МЭЭМ» были разработаны как оригинальные модули, так и модифицированы известные программные средства. Взаимодействие основных модулей представлено на рисунке 3.2. и реализуется следующим образом:

1. Для определения иерархии фреймов-образцов (структуры) ЛОПО используется средство извлечения знаний Protege [106]. Осуществляется инженером по знаниям совместно с экспертами в предметной области.

2. Для заполнения пользователями ЛОПО фреймами-образцами (возможно при помощи инженера по знаниям) используется Protege.

3. Для преобразования информации из разных форматов (например, MS Excel) в форматы ИПК используется модуль «Конвертор».

4. Для автоматизации вычислительных процедур, ввода и редактирования данных, проведения расчетов по модели используется модуль «Расчет».

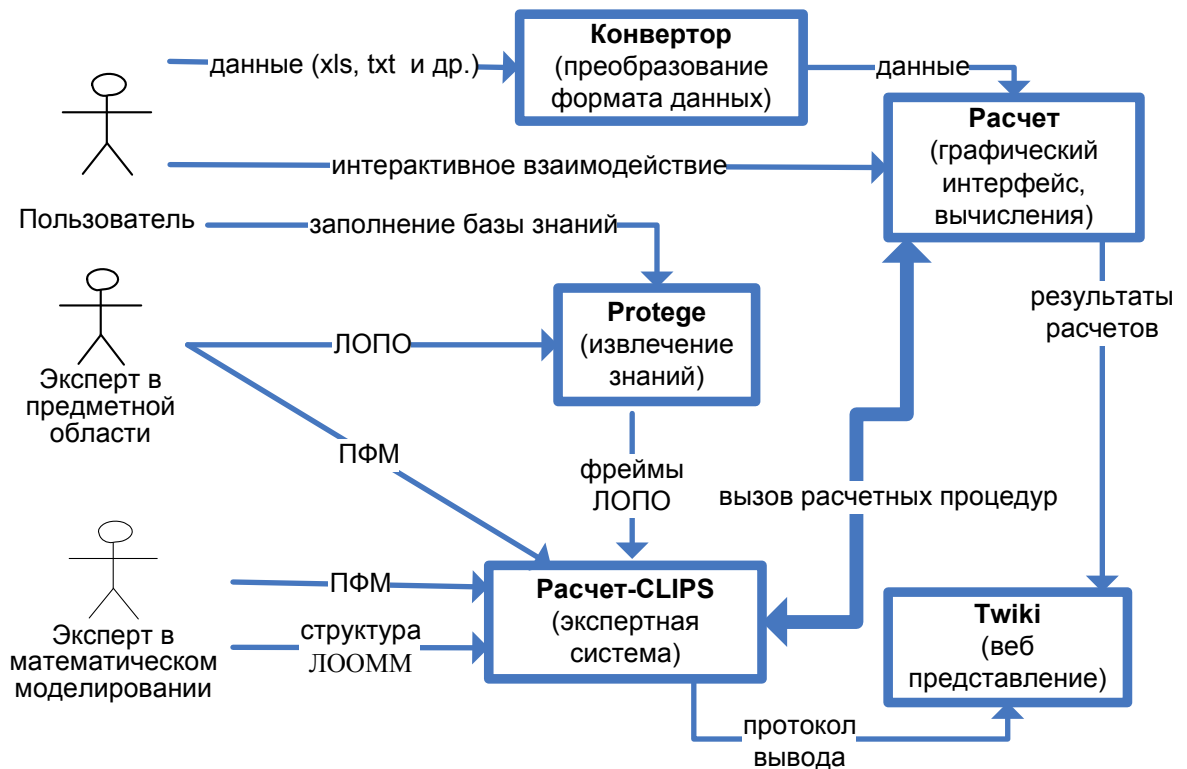


Рисунок 3.2 – Архитектура программного комплекса

5. Для создания интегрированной экспертной системы «Расчет-CLIPS», осуществляющую обработку знаний, представленных в форме продукций и фреймов, используется инструментальное средство CLIPS [77].

6. Результаты расчетов (числовые данные, графики изменения показателей модели по времени) и протоколы логического вывода ЭС (последовательность активированных правил) могут быть выгружены в формате веб-энциклопедии TWIKI [113] с помощью модуля «Модуль-TWIKI».

7. В следующих разделах главы основные модули ИПК «МЭЭМ» рассматриваются более подробно.

Пример работы с интеллектуальным программным комплексом приведен в приложении Б.

3.3.1 Модуль «Расчет»

Модуль «Расчет» основан на программной системе моделирования динамики заболеваемости населения [30]. В рамках рассматриваемого программного комплекса поддержки процесса моделирования его возможности были значительно расширены. Данный модуль содержит большое количество процедур идентификации параметров, позволяет проводить многовариантные расчеты и имеет: графический пользовательский интерфейс; программный интерфейс, через который осуществляется доступ к внутренним функциям, необходимым в процессе построения модели (создание и удаление объектов, вычисления, отображение результатов и т.д.).

Модуль «Расчет» разработан на языке C++ стандарта ISO/IEC 14882 [79], компилятор – Microsoft Visual C++ 2008 Express Edition [115], визуальная среда разработки – Eclipse [82].

Программные объекты модели (ПОМ) – элементы иерархии классов, которая обеспечивает представление на некотором языке объектно-ориентированного программирования (ООП) математической модели и вспомогательных объектов, необходимых для программного сопровождения процесса формирования модели. Все ПОМ являются потомками абстрактного класса «Объект ПОМ» (на языке программирования c++ используется идентификатор SMFObject).

Иерархия классов для представления математической модели представлена на рисунке 3.3.

Класс «поведение» задает либо массив значений, либо некоторую математическую функцию, либо некоторую процедуру (алгоритмическую функцию), для расчета значений какой-либо **одной** переменной. Общий интерфейс для всех потомков класса – `ajMatrix* GetValue(X,t,params)` – возвращает либо матрицу, либо вектор.

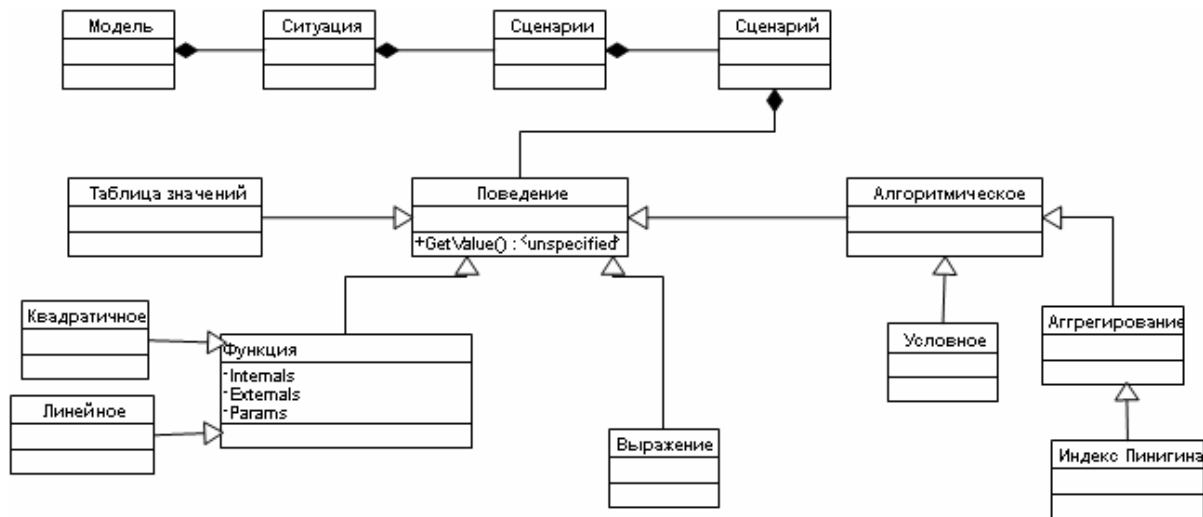


Рисунок 3.3 – Иерархия классов для представления математической модели

Класс «сценарий» осуществляет смену состояний, задаваемых множеством поведений. Сценарий задает начальное и конечное время для каждого своего «поведения».

Для каждого объекта, принадлежащего сценарию, указывается: время начала и конца сценария; переменная, которая интерпретируется как начальная; переменная, которая интерпретируется как время; переменные, значения которых определяются на основе других сценариев.

Класс «сценарий» связывает эндогенную (одну) и экзогенные переменные, задаваемые сценарием, образуя тем самым некоторое уравнение. Для решения уравнения определяется метод решения.

Класс «ситуация» связывает сценарии в систему уравнений.

Простая архитектура моделирования. Для того, чтобы организовать обработку информации, содержащейся в ПОМ, и обеспечить модулям ИПК доступ к ПОМ, используются *функции внешнего интерфейса* модуля «Расчет». Иерархия ПОМ и функции внешнего интерфейса модуля «Расчет» задают программную архитектуру для обработки информации, использующейся в процессе формирования моделей. Такая архитектура в диссертационной работе называется «**простая архитектура моделирования (ПАМ)**» или «**simple modeling framework (SMF)**».

Для хранения информации о ПОМ используется класс «*Источник*», применяемый в ПАМ для обмена информацией между модулями. Класс «*Источник*» содержит следующие поля.

1. Поле «id» – уникальный идентификатор ПОМ.
2. Поле «name» – названия ПОМ.
3. Поле «type» – тип ПОМ, например, «матрица», «регион», «фактор».
4. Поле «parent_info» – ссылка на объект «Источник», содержащий информацию о родительском объекте.
5. Поля «item», «factor» – текстовые поля, используемые для хранения содержательной информации о названиях факторов, с которыми оперирует ПОМ. Например, для матрицы – это названия строк и столбцов.
6. Поле «elsedata» – массив текстовых полей с различной дополнительной информацией.

Некоторые примеры используемых внешнего интерфейса функций приведены в таблице 3.4.

По информации из класса «*Источник*» можно получить ссылку на ПОМ или данные, содержащиеся в нем. Объекты класса «Источник» являются аргументами многих программных функций ПАМ (таблица 3.4).

Блок идентификации модуля «Расчет» содержит программные классы для поддержки процесса определения параметров модели. Все программные классы, связанные с тем или иным методом идентификации, имеют базовый класс *IdentTechnique*. Через интерфейс этого класса производится передача данных для проведения идентификации. В основу этого класса заложена известная идея представления идентифицируемой системы как «черного ящика» [17]. Для идентификации необходимо установить входы (*SetInfluence*), т.е. те переменные, которые изменяются внешней по отношению к исследуемой системе силой; выходы и состояния системы (*SetState*); параметры системы (*SetLink*).

Таблица 3.4 – Примеры функций модуля «МЭЭМ–Расчет»

Имя функции.	Аргументы функции.	Возвращаемое значение.	Описание функции.
Операции с данными и программными объектами модели (ПОМ)			
Получить ПОМ объект	Указатель на объект класса «Источник»; указатель на объект класса «модель»	Указатель на класс «Объект ПОМ»	Возвращает указатель на ПОМ, соответствующий описанию из объекта класса «Источник» для указанной модели.
Создать ПОМ объект	Указатель на объект класса «Источник»	Указатель на класс «Объект ПОМ»	Создает новый объект ПОМ, соответствующий описанию из объекта класса «Источник» для текущей модели
Получить значение	Указатель на объект класса «Источник»; дополнительная информация, передаваемая в массиве текстовых полей	Пустой указатель (типа void)	Позволяет получать данные, хранимые в ПОМ. Например, для «матрицы» это будет значение элемента в i -ой строке и j -ом столбце
Вызов вычислительных процедур			
Запустить ПОМ объект	Указатель на объект класса «Источник»	Булевый индикатор результата выполнения функции.	Позволяет выполнить операцию по умолчанию для ПОМ. Например, найти численное решение системы уравнений, задающий модель (класс «ситуация»)

Классы - потомки осуществляют интерпретацию переданных данных и выполнение процедуры идентификации в зависимости от конкретных методов: метод возмущений (PTLinDE – для дифференциальных уравнений), прямой метод идентификации (DIMforHLinDE – для линейных ОДУ).

Программные классы, связанные с генерацией данных, необходимых для определения параметров модели, имеют базовый класс *VirtualExperiment*. Цель данного блока является предоставление данных для конкретных методов идентификации. Эти данные могут формироваться после проведения численных расчетов на основе полученных ранее в ПС моделей; в результате имитационных экспериментов могут выделяться из массива данных на основе специальных алгоритмов, учитывающих экспертные представления

об исследуемых данных (ExtractionVirtualExperiment, FormationVirtualExperiment).

В связи с тем, что при идентификации необходимо учитывать большое количество разнообразных данных, экспертных суждений, а также специфических условий метода, настройки по проведению идентификации выделяются в отдельную совокупность классов. Задачей класса «*BaseIdentifier*» является определение, на основе заданной пользователем комбинации настроек, необходимых методов идентификации, и, если необходимо, методов генерации данных.

Программные классы, связанные с использованием численных методов при решения уравнений, задающих математическую модель системы, содержатся в **блоке решения систем уравнений** модуля «Расчет». К этому блоку относятся следующие программные классы.

Численные библиотеки, имеющие базовый класс *EquationSolver*. Через интерфейс этого класса осуществляется реализация численного метода решения уравнения либо с некоторым шагом («Решить_С_Шагом»), либо до некоторой точки («Решить_До»). На диаграмме приведен пример библиотеки, решающей дифференциальное уравнение методом Рунге-Кутты (рисунок 3.4).

Базовый класс *Equation* для программных объектов модели (*Situation*, *Scenarios*). Через интерфейс этого класса численные методы (ЧМ) получают доступ к расчетным функциям систем уравнений, задающих модель. При этом нет необходимости передавать в ЧМ специфическую информацию о составных частях уравнений. Такой подход позволяет легко адаптировать и использовать численные методы, написанные другими разработчиками.

Перед началом вычислений на основе информации, содержащейся в модели, формируется календарь *Календарь* – список переходов с условием *после*, упорядоченный по значению времени срабатывания. Смена состояний *список_срабатывающих_переходов* – список переходов, которые готовы к

срабатыванию в данной точке дискретного времени. Сценарий изменяет текущее активное поведение в зависимости от момента глобального времени.

Укрупненная схема формирования ПОМ при проведении расчетов:

1. Обнуление календаря.
2. Формирование списка ПОМ для текущего расчета.
3. Регистрация начального и конечного моментов времени расчетов в календаре.
4. Регистрация других событий в календаре.

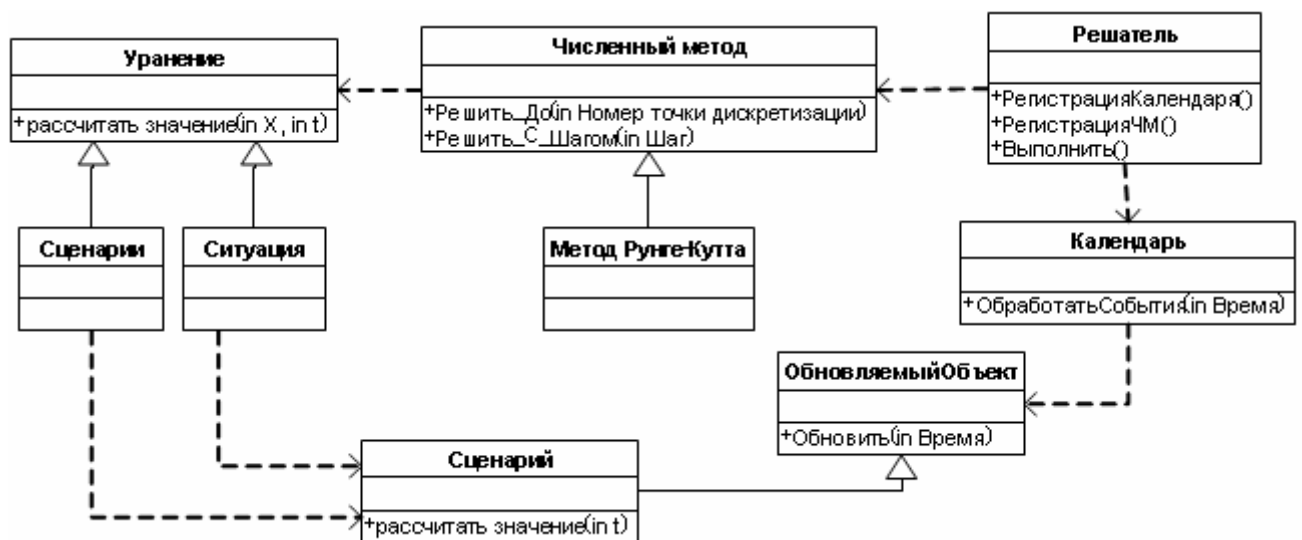


Рисунок 3.4 – Система классов для проведения расчетов

5. Регистрация календаря в решателе.
6. Инициализация ЧМ (установление необходимых параметров численного метода).
7. Регистрация ЧМ в решателе.
8. Решение (запуск решателя).
9. Обработка результатов расчетов: сохранение данных; в случае аварийного останова – определение класса ошибок.
10. Визуализация результатов решения.

3.3.2 Экспертная система «Расчет–CLIPS»

Основной задачей интегрированной экспертной системы (ИЭС) *Расчет-CLIPS* является обработка в рамках представленной схемы логической составляющей процедур формирования моделей (ПФМ).

ИЭС «Расчет-CLIPS» реализуется на основе продукционной системы с базой знаний фреймового типа, снабженной механизмом наследования. Для реализации *Расчет-CLIPS* была выбрана оболочка для построения экспертных систем CLIPS (C Language Integrated Production System) [77]. Рассмотрим основные характеристики этой оболочки, которые послужили причиной использования CLIPS как основы для разработки ЭС:

- 1) является одной из самых популярных бесплатных оболочек для создания ЭС, а исходные тексты программы опубликованы в сети Интернет;
- 2) реализует прямой логический вывод с использованием алгоритма сопоставления с образцом RITE [81];
- 3) использует несколько стратегий разрешения конфликтных ситуаций;
- 4) для представления знаний использует продукции, фреймы и объекты (встроенный объектно-ориентированный язык COOL);
- 5) обеспечивает модульную структуру организации баз знаний;
- 6) предоставляет интерфейсы для доступа к своим внутренним функциям и содержит механизмы для вызова функций, объявленных во внешних модулях.

ИЭС «Расчет-CLIPS» разрабатывалась согласно принципам глубинной интеграции компонентов [59], где оболочка ЭС усовершенствована путем включения функций модуля «Расчет». *ИЭС «Расчет-CLIPS»* управляет процессом формирования модели и активно взаимодействует с модулем «Расчет», вызывая его расчетные процедуры.

Возможность модульной организации правил в CLIPS позволяет реализовать экспертную систему с доской объявлений, где каждому этапу

моделирования соответствует свой модуль. В ИЭС «*Расчет-CLIPS*» также реализована поверхностная интеграция с модулями «Protege» и «Модуль-Twiki». Protege-frames использует для внутреннего хранения информации расширенную нотацию CLIPS, поэтому передача заполняемой пользователем в Protege ЛОПО осуществляется практически без изменений (осуществляется лишь добавление служебной информации для CLIPS). Благодаря реализованному в CLIPS механизму протоколирования процесса логического вывода, существует возможность сохранить действия, осуществленные ЭС при формировании модели, для дальнейшего анализа. Протокол вывода для дальнейшего отображения и анализа передается в «Модуль-Twiki».

В настоящее время в ИЭС «*Расчет-CLIPS*» нет специальных методов анализа непротиворечивости и полноты знаний. Для разрешения конфликтных ситуаций в процессе логического вывода ИЭС «*Расчет-CLIPS*» использует встроенные средства CLIPS.

В CLIPS модуль объявляется с помощью ключевого слова `defmodule`. Для каждого модуля существует свой набор правил и план решения задачи (*agenda*). Фреймы, объявленные внутри модуля, доступны извне, если это явно определено с помощью ключевого слова `export`. Это дает возможность организовать логический вывод для каждого этапа независимо и только на тех данных и знаниях, которые для этого необходимы. Как было указано выше в разделе 3.1.2, взаимодействие между модулями ИЭС «*Расчет-CLIPS*» осуществляется с помощью фрейма «состояние моделирования».

3.3.3 Вспомогательные модули

Модуль «Конвертор». Данные, используемые при идентификации параметров модели и сценарных расчетах, поступают из разных источников и в разных форматах. Для решения задачи автоматического преобразования информации из разных форматов и типов файлов (в основном текст и MS

Excel) в форматы программной системы разработан специальный модуль преобразования данных. Информация о том, как интерпретировать данные в исходном форматировании, содержится в файлах-настройках (XML-файлах).

Система «Protégé». Для сбора информации от пользователей и экспертов как средство приобретения знаний используется свободно распространяемая программа Protégé-frames [106]. На основе разработанной объектной модели предметной области Protégé предоставляет несколько вариантов графических элементов, с помощью которых возможен ввод информации и заполнение базы знаний в виде иерархии фреймов.

При использовании *Protégé* в рамках интеллектуального программного комплекса заполнение информационно-логического описания предметной области пользователем происходит через визуальный элемент Protégé - *GraphWidget*, который позволяет в удобной форме отобразить объекты ЛОПО и связывающие их отношения.

Также в Protégé существует еще несколько видов визуального отображения: *Jambalaya* и *TGVisTab*, позволяющие просматривать и редактировать отдельные части объектной модели предметной области.

Для объединения, включения и анализа различных вариантов объектной модели предметной области *Protégé* использует модуль *OntoViz*.

В настоящее время существует большое количество доступных плагинов, добавляющих и расширяющих функциональные возможности Protégé. Например, плагин для работы с системой унифицированного медицинского языка UMLS [114].

Модуль–TWIKI. Одной из важных задач при формировании моделей является документирование процесса их построения. Это становится еще более важным, когда отдельные этапы этого процесса осуществляются в автоматическом режиме. Результаты вычислений и решений, принятых ИЭС «Расчет-CLIPS», сохраняются в «Модуль–TWIKI». Данный модуль разработан на основе свободно распространяемой системы TWIKI [113], которая используется для создания структурированных веб энциклопедий.

Благодаря расширяемости TWIKI за счет плагинов, возможны различные формы представления информации: текст, таблицы данных, графики и диаграммы. *Модуль—TWIKI* может также использоваться как справочная система, средство для удаленного взаимодействия разработчиков моделей, архив файлов с исходными данными или сформированными моделями.

Графический пользовательский интерфейс. Графический пользовательский интерфейс основан на библиотеке MFC (Microsoft Foundation Classes) [37], представляющей собой объектную оболочку API функций ОС Windows. Формы, диалоги и структурированные элементы меню ПС формируют дружелюбный пользовательский интерфейс. Множество форм и диалогов разработаны с использованием как стандартных, так и свободно распространяемых элементов графического интерфейса. С помощью диалогов пользователь может настраивать параметры работы блоков и запускать их на выполнение непосредственно из программной системы. Кроме того, некоторые диалоги запускаются автоматически в процессе работы экспертной системы, чтобы запросить необходимую дополнительную информацию для логического вывода.

Визуализация данных осуществляется в виде таблиц и графиков. Настройки системы вывода позволяют изображать 2-х мерные графики для любых доступных в модели массивов одинаковой размерности и графики зависимости от времени.

4 ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ И ПРИКЛАДНЫЕ ЗАДАЧИ

В четвертой главе более подробно описываются ключевые этапы формирования моделей различных вариантов медико-эколого-экономических систем, представлены сформированные модели для различных регионов.

4.1 Модель динамики заболеваемости населения

4.1.1 Описание модели

В модели исследуется обращаемость населения за медицинской помощью по разным видам заболеваемости, разбитая по трем возрастным группам. Значения показателей модели второго уровня в этом случае можно считать как дезагрегацию показателя модели верхнего уровня (общая заболеваемость). Общий подход к построению подобных моделей, описывающих динамику заболеваемости населения, подробно представлен в монографии [50].

В разработанном в диссертации варианте модели уровень длительного загрязнения рассматривается в двух переменных: векторной ($R^{ch}(t)$) и скалярной ($R^{int}(t)$). Такое разделение связано с наличием знаний экспертов относительно влияние загрязнителей на заболеваемость населения, что в дальнейшем позволит применить к идентификации параметра, отражающего влияние $R^{ch}(t)$, специальные методики идентификации. Если влияние некоторого загрязнителя хорошо изучено, то он включается в состав $R^{ch}(t)$. Если эксперты затрудняются количественно оценить эффект влияния загрязнителя на состояние заболеваемости населения, то он включается в интегральный показатель Пинигина [58], для которого такие оценки существуют. Кроме того, влияние производства на заболеваемость

рассматривается опосредовано, через уровни загрязнений. Математическая модель задается следующей системой обыкновенных дифференциальных уравнений:

$$\frac{dz}{dt} = Qz + CR^{ch} + AR^{ac} + BR^{int}, \quad (4.1)$$

$z = x - x^*(t)$ – отклонение от естественного состояния показателей модели,

$x(t)$ – векторный показатель, характеризующий состояния здоровья населения,

$R^{ch}(t)$ – вектор, характеризующий уровень длительного загрязнения. В этот вектор включаются те загрязняющие вещества, для которых существует экспертная информация, позволяющая проводить идентификацию матрицы параметров C .

$R^{ac}(t)$ – вектор краткосрочного сильного загрязнения, значительно превосходящий уровень хронического. С помощью этого фактора могут моделироваться аварийные выбросы на предприятии или резкое увеличение концентрации загрязнений из-за пожаров.

$R^{int}(t)$ – скалярный интегральный показатель загрязнения атмосферного воздуха, не вошедших в вектор $R^{ch}(t)$.

Q – матрица, отражающая процесс самовосстановления и взаимовлияния показателей модели.

C, A, B - матрицы, отражающие влияние $R^{ch}(t)$, $R^{ac}(t)$, $R^{int}(t)$.

В качестве характеристики состояния здоровья населения в модели используется показатель заболеваемости - совокупность вновь возникших заболеваний за календарный год, рассчитываемый как отношение числа вновь возникших заболеваний к средней численности населения, умноженное на 1000 [68]. Учёт заболеваемости осуществляется по обращаемости за медицинской помощью в учреждения здравоохранения. При идентификации модели использованы данные государственного социально-гигиенического мониторинга, реализованного на базе ЦГСЭН

(центр государственного санитарно-эпидемиологического надзора) по Иркутской области.

Исследовались следующие заболеваемости: болезни органов дыхания, ОРЗ, болезни крови, неинфекционные болезни кожи, болезни костно-мышечной системы (КМС), болезни нервной системы. Каждая заболеваемость рассматривалась по трём возрастным группам: дети (0-14 лет), подростки (15-18 лет), взрослые (лица старше 18 лет). Такое выделение возрастных групп вызвано, во-первых, особенностями формирования уровня и структуры заболеваемости, во-вторых, доступностью существующих данных мониторинга.

В модели в качестве загрязнителей были выбрано загрязнение атмосферного воздуха. Для характеристики «хронического» загрязнения R^{ch} использовались концентрации (мг/м³) в атмосферном воздухе следующих загрязнителей: сажа, аммиак, фенол, формальдегид, азота диоксид, взвешенные вещества, оксид углерода. Для вычисления скалярного интегрального показателя R^{int} применялся подход, разработанный Пинигиным [58].

Данная модель и ее варианты рассматриваются в работах [7, 10, 30, 109].

Для модели динамики заболеваемости населения был сформирован сценарий, который отражает план снижения выбросов в атмосферный воздух по городу Ангарску. Согласно этому плану, в результате модернизации и технического перевооружения на станциях ТЭЦ предполагается повышение коэффициента улавливания золы и оптимизация процесса горения, а также использование малосернистых и малозольных углей. Такие меры должны привести к снижению выбросов: оксидов азота на 44 тонны и твёрдых (взвешенных веществ) на 62 тонны в год. Стоимость данных мероприятий 27 млн. рублей. В сценарии также предполагается, что специальные мероприятия на ОАО АНХК, проведенные в период с 2004 по 2008, привели к снижению суммарных выбросов на 0,4 тыс. тонн в год, из них: взвешенные

вещества 80 тонн и оксиды азота 150 тонн. Затраты на проведение мероприятий на ОАО АНХК составляют 31,2 млн. рублей в год.

4.1.2 Особенности применение компонентного эксперимента

Описание применения компонентного эксперимента для модели динамики заболеваемости населения приведено в монографии [50]. Интерпретация однокомпонентного эксперимента для матрицы параметров модели Q означает, что диагональные элементы q_{ii} характеризуют скорость естественного самовосстановления показателей заболеваемости, при условии, что остальные компоненты находятся в естественном состоянии и нет внешнего воздействия. В случае принятия гипотез однокомпонентного эксперимента модель динамики заболеваемости населения (4.1) будет иметь вид:

$$\frac{dz_i}{dt} = q_{ii} z_i \Rightarrow q_{ii} = \frac{1}{z_i} \frac{dz_i}{dt} \Rightarrow q_{ii} = \frac{1}{t_1 - t_0} \ln \frac{z_1}{z_0}, \quad (4.2)$$

где $z(t_0)=z_0$, $z(t_1)=z_1$, z_0 – заданы, а z_1 – величина, близкая к фоновому уровню. Под естественным уровнем (фоновым уровнем) понимаются такие показатели здоровья, которые характерны для населения экологически благополучных территорий со средним (и выше) уровнем медицинского обслуживания и по своему значению ниже среднерегиональных. Для определения естественного уровня используют от трёх до пяти таких фоновых территорий, либо многолетнюю (больше 11 лет) статистику по одной территории. Например, при идентификации модели города Анагрска в качестве фоновой территории экспертами был выбран город Нижнеудинск Иркутской области.

Выбор фоновых территорий позволил исключить влияние следующих факторов на скорость естественного самовосстановления показателей заболеваемости:

- 1) природно-климатических;
- 2) социально-экономических (социальной инфраструктуры (прежде всего жильё), уровня заработной платы (и задолженность по ней), уровня безработицы, уровня образования).

Также предполагается известным период $t_1 - t_0$, под которым понимается период восстановления естественного уровня заболеваемости при отсутствии загрязнений окружающей среды. При его определении экспертами учитываются следующие факторы:

1. Фактор возрастной динамики в следующих возрастных группах 0-12; 15-18; лица старше 18 лет:

- часть населения из детской возрастной группы переходит в подростковую, а часть – из подростковой во взрослую;
- во взрослую возрастную группу приходят часть подростков, а в подростковую – часть детей.

2. Фактор склонности к «хронизации».

- Известно, что среди населения экологически благополучных территорий 5% популяции склонны к «хронизации» патологических процессов. При воздействии внешних факторов доля таких лиц увеличивается.

3. Фактор взаимовлияния болезней.

- У определённой доли лиц с хроническими заболеваниями или часто длительно болеющих за счёт снижения защитных сил организма, взаимовлияние болезней происходит через образование «порочного круга», когда увеличивается восприимчивость к биологическим и химическим агентам, растет число заболеваний. Из-за этого растёт число лиц, склонных к «хронизации» патологических процессов, увеличивается период самовосстановления популяции.

Дальнейшая идентификация матрицы Q производится не для всех внедиагональных элементов, а только для тех, где экспертами достоверно установлено влияние j -ой заболеваемости на i -ую (таблица 4.1). В таблице 4.1

представлен фрагмент схемы взаимовлияния заболеваемости для некоторых болезней, и использованы обозначения: «ОД» – болезни органов дыхания; «ОРЗ» – болезни ОРЗ; «взр.» – взрослые; X означает, что связь существует.

Для параметрической идентификации элементов матрицы C используется формула (2.3.11), которая для модели динамики заболеваемости населения примет вид формулы 4.3:

$$c_{ik} = \frac{q_{ii}(z_i(t_1) - z_i(t_0))e^{q_{ii}(t_1-t_0)}}{\bar{R}_k^{ch}(e^{q_{ii}(t_1-t_0)} - 1)}. \quad (4.3)$$

Таблица 4.1 – Фрагмент схемы взаимовлияния заболеваемости

	ОД до 14	ОД 15-18	ОД взр.	ОРЗ до 14	ОРЗ 15-18	ОРЗ взр.
ОД до 14				X		
ОД 15-18	X				X	
ОД взр.		X				X
ОРЗ до 14						
ОРЗ 15-18				X		
ОРЗ взр.					X	

Для моделирования условий идеализированного эксперимента согласно общему алгоритму формирования моделей и процедуре компонентного эксперимента необходимо использовать экспертные знания о закономерностях в предметной области.

В эпидемиологических исследованиях получены данные, подтверждающие зависимость нарушений здоровья от содержащихся в воздухе химических веществ. Эта информация представлена в виде критериев оценки эффектов воздействия загрязняющих веществ. Эффекты измеряются как прирост показателей здоровья (либо в процентах, либо в дополнительном количестве случаев на определённую численность населения) при возрастании концентрации вредного вещества на $10 \text{ мкг/м}^3 =$

0,01 мг/м³. Например, эффекты воздействия диоксида азота и пыли приведены в таблицах 4.2 и 4.3

Таблица 4.2 – Критерии оценки эффектов «хронического» воздействия диоксида азота на 10 мкг/м³

Показатель	Эффект	% прироста
Заболеваемость органов дыхания	Увеличение частоты заболеваний верхних дыхательных путей	3,8
	Увеличение частоты заболеваний нижних дыхательных путей	6,6

Таблица 4.3 – Критерии оценки эффектов «хронического» воздействия пыли на 10 мкг/м³

Показатель		% прироста
Заболеваемость органов дыхания	Бронхита у детей	11
	Бронхита у детей	0,4
	Бронхита взрослые	0,8

Учитывая подобного рода закономерности и статистическую информацию о концентрации загрязняющих веществ и заболеваемости населения, можно сформировать данные, удовлетворяющие гипотезе о компонентном эксперименте, и вычислить значения элементов матрицы параметров S . Пусть в данном случае индекс 1 – номер загрязнителя «диоксид азота» в векторе R^{ch} , и 1 – номер органов дыхания в векторе заболеваемости z . Тогда учитывая, что ПДК диоксид азота – 0,4 мг/м³, общий критерий из таблицы 4.2 – 10,4%, а текущий уровень заболеваемости $z_1(t_0) = 300$ обращений на 1000 человек (условные данные), получим, что $\bar{R}_1^{ch} = 0,05$, $z_1(t_1) = 331,2$.

4.1.3 Результаты расчетов для города Ангарска

При анализе результатов расчетов по сценарию оказалось, что внедрение природоохранных мероприятий на крупнейших предприятиях приводит к снижению заболеваемости населения (таблица 4.4). Наиболее выражен благоприятный эффект на здоровье детского населения, проявляющийся снижением заболеваемости органов дыхания в целом и острых респираторных заболеваний (62% от болезней органов дыхания). Снижение показателей заболеваемости у подростков и взрослых происходит в равной степени за счёт сокращения острых респираторных и обострения хронических болезней. Настоящий сценарий не учитывает уменьшение других специфических выбросов, которые также будут влиять на снижение показателей заболеваемости.

Для вычисления значений по третьему столбцу («уменьшение числа обращений») таблицы 4.4 необходимо перейти от относительных значений показателя заболеваемости к абсолютным.

Таблица. 4.4 – Сценарий «уменьшение выбросов оксидов азота и взвешенных веществ ТЭЦ и АНХК»

Показатель заболеваемости	Уменьшение показателя заболеваемости	Уменьшение числа обращений	Уменьшение реального эк. ущерба (тыс. руб.)
Болезни органов дыхания (0-14)	11,8	798	2673
Болезни органов дыхания (15-18)	6,71	114	377
Болезни органов дыхания (>18)	2,52	461	1968
ОРЗ (0-14)	7,13	499	1450
ОРЗ (15-18)	3,28	56	169
ОРЗ (взрослые)	1,6	293	1053
Сумма			5018

Для пересчета использовались данные о численности возрастных групп города Ангарска (экспертная оценка), представленная в таблице 4.5.

Таблица 4.5 – Численность возрастных групп города Ангарска

Возрастная группа	Численность населения (человек)
Дети (0-14 лет)	70 000
Подростки (15-18)	17 000
Взрослые (>18)	183 000
Всего	270 000

Реальный экономический ущерб рассчитывается по расширенной методике, основанной на прямых и дополнительных затратах общества. Подробное описание этой методики дано в приложении В.

4.2 Модели динамики заболеваемости населения г. Улан-Батор

Динамика заболеваемости населения описывается следующей системой дифференциальных уравнений:

$$\frac{dx}{dt} = Qx + Bu + C(T^{\circ} - T^{\circ*}), \quad (4.4)$$

где t – время, $x(t)$ – вектор, характеризующий число случаев заболевания в течение недели, $u(t)$ – скалярный показатель длительного (хронического) загрязнения атмосферного воздуха, измеряемый в долях среднесуточной предельно допустимой концентрации (ПДК_{СС}), при его расчете используются концентрации следующих веществ: CO (мг/м³), NO₂(мкг/м³), NO(мкг/м³), PM10(мкг/м³), SO₂(мкг/м³), $T^{\circ}(t)$ – средняя температура (°C) в течение недели, $T^{\circ*}(t)$ – средний многолетний уровень температуры в течении недели, вектора B и C отражают влияния загрязнения и температуры, матрица Q

отражает процессы самовосстановления здоровья и взаимовлияния болезней. Данная модель и ее варианты рассматриваются в работах [11, 29].

4.2.1 Модель динамики заболеваний населения г. Улан-Батор без учетом возрастной структуры населения

Учитывая выраженную сезонность патологии органов дыхания, в течение зимнего сезона рассматривалась частота 4 нозологических формы из класса болезней органов дыхания по международной классификации болезней (МКБ-10):

- острые респираторные заболевания (ОРЗ, код МКБ-10 J00-J06);
- острый бронхит (J20);
- хронические болезни верхних дыхательных путей (J30-31);
- хронические болезни миндалин и аденоидов (J35).

К числу факторов, определяющих уровень заболеваемости по классу болезней органов дыхания, относят загрязнение атмосферного воздуха химическими примесями, поступающими из техногенных источников. Наблюдаемая динамика фактического содержания примесей в долях ПДК и сумма долей ПДК представлена на рисунках 4.1 и 4.2.

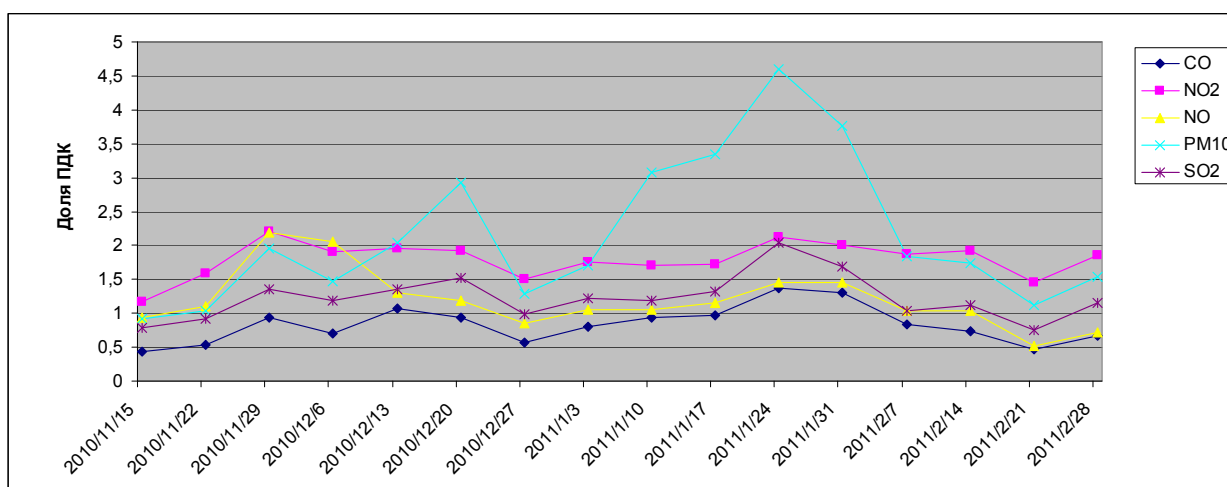


Рисунок 4.1 – Динамика загрязнения отдельными примесями атмосферного воздуха г. Улан-Батора в зимний период (кратность ПДК)

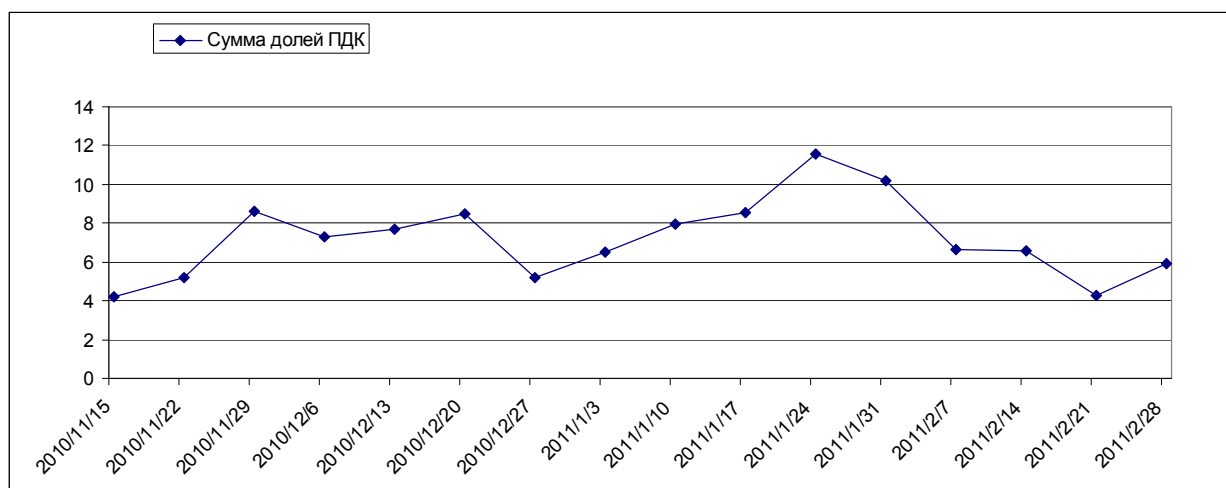


Рисунок 4.2 – Динамика суммарного загрязнения атмосферного воздуха г. Улан-Батора в зимний период (сумма кратности ПДК)

Другим важным фактором, способствующим формированию патологии органов дыхания в зимний период, является низкая температура воздуха, характерная для Улан-Батора. В связи с тем, что на изучаемой территории климат сложился в течение многих столетий, местное население в достаточной мере адаптировано к температурному режиму. Однако изменения метеорологических параметров могут вызвать напряжение компенсаторно-восстановительных механизмов и создать условия для повышения восприимчивости человека к патогенным организмам (вирусам, бактериям) и, следовательно, росту заболеваемости. В связи с этим, в модели использована температура в отклонениях от среднегодового уровня (рисунок 4.3).



Рисунок 4.3 – Динамика температуры в отклонениях (°C)

Результаты идентификации. Значения параметров модели представлены в таблицах 4.6 – 4.8.

Таблица 4.6 – Вектор параметров B .

	B
u_1	56,97
u_2	3,21
u_3	0,96
u_4	1,42

Таблица 4.7 – Вектор параметров C .

	C
T_1^o	-12,07
T_2^o	6,07
T_3^o	2,81
T_4^o	3,28

Таблица 4.8 – Матрица параметров Q .

Q	x_1	x_2	x_3	x_4
x_1	-1,071	0,007	0,0035	0,0035
x_2	0	-0,644	0,0035	0,0035
x_3	0,42	0	-0,175	0
x_4	0,42	0	0	-0,175

В приведенных выше таблицах 4.6 – 4.8 обозначения строк и столбцов соответствуют переменным модели (4.4). Идентификация модели проведена в сравнении фактических и расчетных уровней абсолютного числа случаев оказания стационарной помощи при острых (ОРЗ, острый бронхит) и хронических заболеваниях (верхних дыхательных путей (J30-31) и миндалин и аденоидов (J35)). Пример результатов для ОРЗ приведен на рисунке 4.2.4.

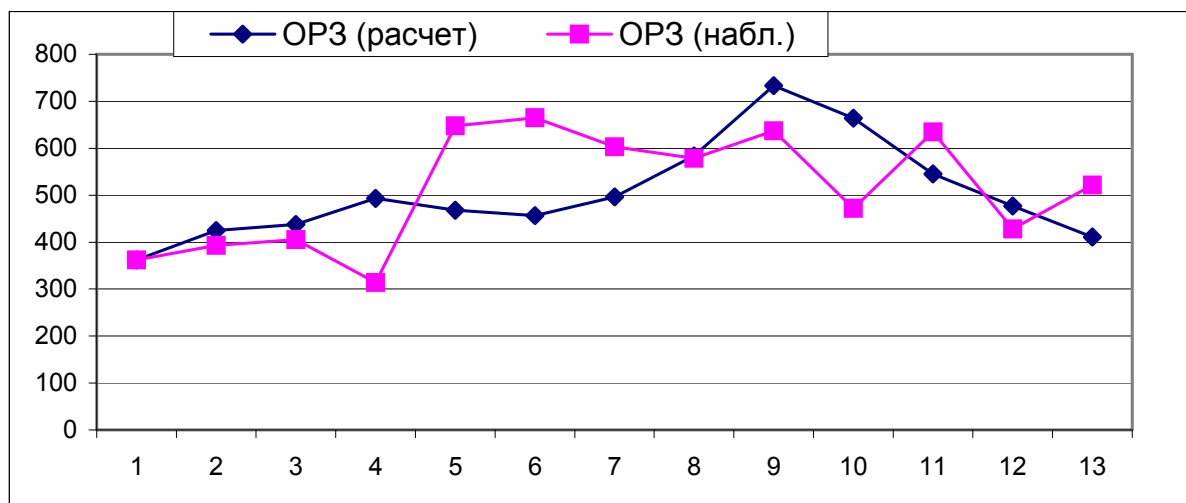


Рисунок 4.4 – Динамика расчетного и фактического числа случаев острых заболеваний органов дыхания у населения Улан-Батора в зимний период

4.2.2 Модель динамики заболеваний населения г. Улан-Батор с учетом возрастной структуры населения

Динамика указанных ранее нозологических форм (ОРЗ (J00-J06); острый бронхит (J20); хронические болезни верхних дыхательных путей (J30-31); хронические болезни миндалин и аденоидов (J35)) изучена в трех группах: дети (0-14лет), подростки (15-17 лет) и взрослые (старше 18 лет) в связи со значительными колебаниями частоты оказания стационарной помощи при патологии органов дыхания в зависимости от возраста и обусловленными этим различиями вклада факторов внешней среды в формирование нарушений здоровья.

В результате параметрической идентификации модели получены значения параметров B , C и Q для модели динамики заболеваний населения г. Улан-Батор с учетом возрастной структуры населения. Некоторые из этих значений представлены в таблицах 4.9, 4.10.

Таблица 4.9 – Вектор параметров B и C

Номер компонента вектора	B	C
1	51,57	5,86
2	3,20	-0,53
3	19,64	-2,98
4	1,93	-2,01
5	0,18	0,02
6	2,41	-2,93
7	0,07	-0,28
8	0,06	-0,02
9	1,26	6,52
10	0,01	-1,34
11	0,09	-0,43
12	1,57	2,83

Таблица 4.10 – Фрагмент матрица параметров Q

Номер компонента вектора	1	2	3	4	5	6
1	-1,07648	0	0	0	0	0
2	0,00548	-1,07739	0	0	0	0
3	0	0,00639	-1,071	0	0	0
4	0,00769	0	0	-0,64948	0	0
5	0	0,00769	0	0,00548	-0,65039	0
6	0	0	0,00769	0	0,00639	-0,644

В качестве примера, поясняющего качество идентификации, приведем динамику расчетного и фактического числа случаев заболеваний ОРЗ по трем возрастным группам на рисунке 4.5.

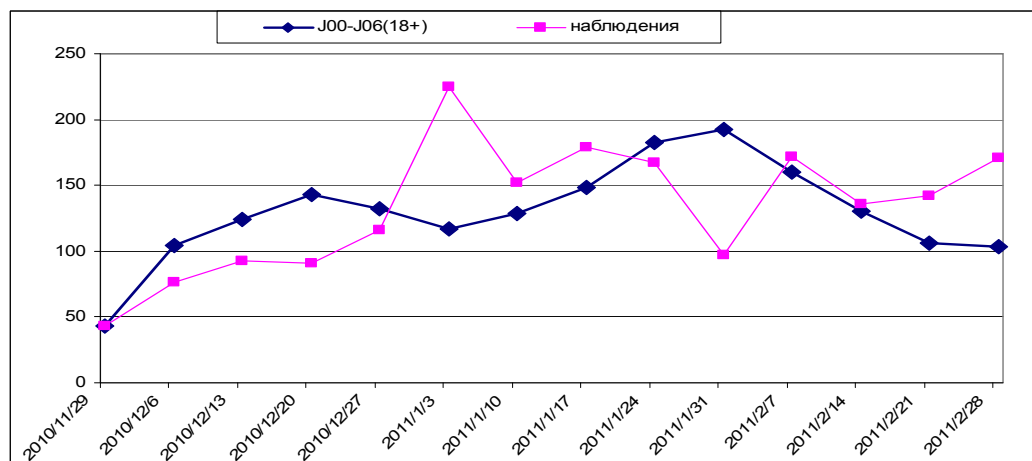
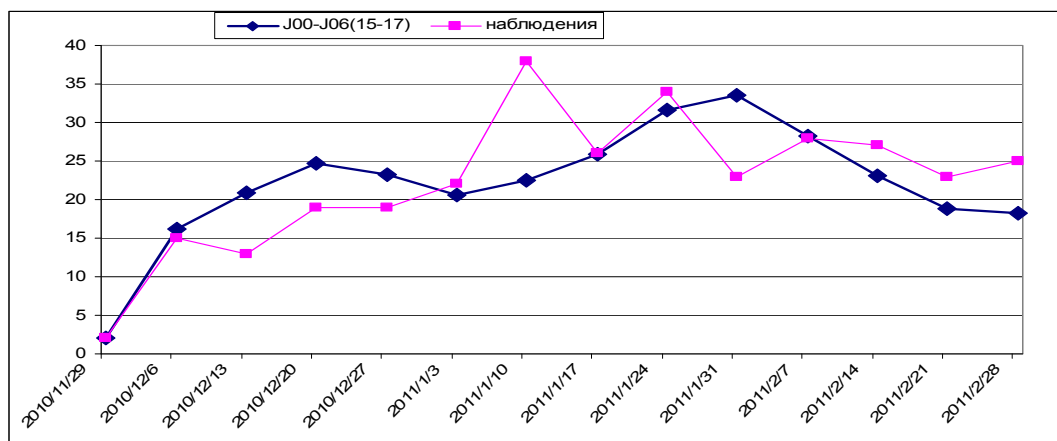
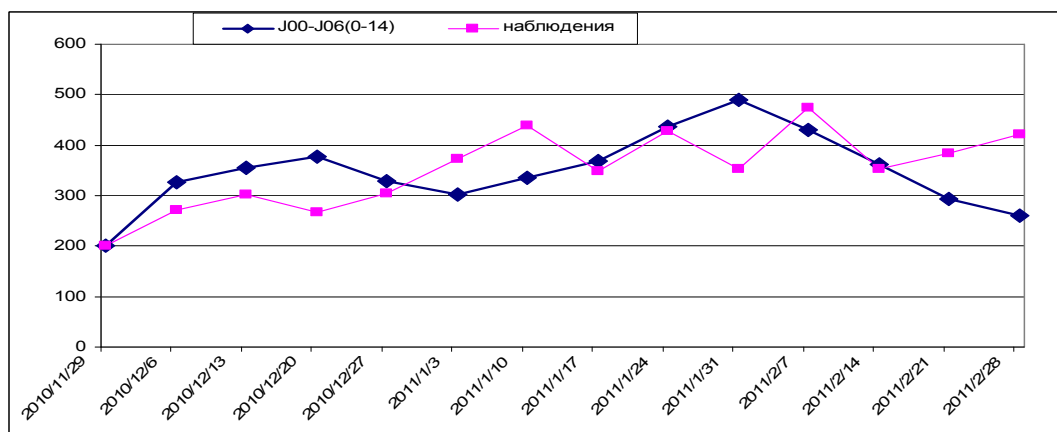


Рисунок 4.5 – Динамика расчетного и фактического числа случаев острых респираторных заболеваний у детского, подросткового и взрослого населения Улан-Батора в зимний период

4.3 Типовая медико-эколого-экономическая математическая модель

Типовая медико-эколого-экономическая модель разрабатывалась в соответствии с подходами, которые использовались при разработке оптимизационных межрегиональных межотраслевых моделей [32] и эколого-экономических моделей Байкальского региона [20].

4.3.1 Структура модели

Рассматривается $N^{(r)}$ взаимодействующих регионов, экономическая система которых состоит из $N^{(X)}$ отраслей. Пусть $r \in \{1, \dots, N^{(r)}\}$ – индекс региона, $i, j \in \{1, \dots, N^{(X)}\}$ – индексы отраслей. Тогда соотношения баланса для продукции $N^{(r)}$ отраслей и m видов ресурсов в регионе r имеет вид

$$X_i^r(t) \geq \sum_{j=1}^{N^{(X)}} A_{ij}^r(t) X_j^r(t) + \tilde{X}_i^r(t) + \alpha_i^r z^r(t) + \sum_{s=1}^{N^{(r)}} (X_i^{rs}(t) - X_i^{sr}(t)) + q_i^r(t) + \sum_{j=1}^{N^{(X)}} u_j^r(t), \quad (4.5)$$

где $\forall i \in I^{(X)}$, $\tilde{X}_i^r(t) = \sum_{k=1}^{N^{(R)}} [A_{ik}^{r(y)}(t) y_k^r(t) + w_k^r(t)]$ и $X_i^{sr}(t) = \sum_{\tau \in I^{(\tau)}} \tilde{X}_{\tau}^{sri}(t)$.

$$X_i^r(t) \geq \sum_{j=1}^{N^{(X)}} A_{ij}^r(t) X_j^r(t) + \sum_{j=1}^{N^{(X)}} \sum_{s=1}^{N^{(r)}} A_{ij}^{sr}(t) \tilde{X}_i^{srj}(t) + \tilde{X}_i^r(t) + \alpha_i^r z^r(t) + q_i^r(t), \text{ где } \forall i \in I^{(\tau)}. \quad (4.6)$$

Здесь все множество индексов отраслей $I = \{1, 2, \dots, N^{(X)}\}$ разделено на два подмножества $I = I^{(X)} \cup I^{(\tau)}$, где $I^{(\tau)}$ – множество индексов транспортных отраслей, а $I^{(X)}$ все остальные отрасли.

Пусть $i, j \in \{1, \dots, N^{(R)}\}$ – индексы медико-экологических показателей, где $N^{(R)}$ – количество медико-экологических показателей, $k \in \{1, \dots, N^{(X)}\}$ – индекс отрасли, тогда уравнения динамики медико-экологических показателей описываются системой линейных дифференциальных уравнений:

$$\dot{R}_i^r = \sum_{j=1}^{N^{(R)}} Q_{ij}^r(R_j^r - R_i^{r*}) - \sum_{k=1}^{N^{(X)}} C_{ik}^r X_k^r - \sum_{k=1}^{N^{(X)}} D_{ik}^r u_k^r - \sum_{j=1}^{N^{(R)}} D_{ij}^{r(y)} w_i^r - C_i^{r(L)} L + J_{ii} y_i^r. \quad (4.7)$$

Баланс ежегодных капитальных вложений в основные отрасли экономики и отрасли, восстанавливающие медико-экологическое состояние.

$$K_i^r(t) \leq u_i^r - \beta_{ii}^r X_i^r; i \in \{1, \dots, N^{(X)}\}; \quad (4.8)$$

$$K_j^{r(y)} \leq w_j^r - \beta_j^{r(y)} y_j^{r(y)}, j \in \{1, \dots, N^{(R)}\}. \quad (4.9)$$

В модели приняты ограничения на основные трудовые ресурсы

$$\sum_{i=1}^{N^{(X)}} l_i^r(t) X_i^r(t) \leq L^r(t) \quad (4.10)$$

на отдельные переменные по выпуску в отраслях и интенсивность восстановления ресурсов

$$\underline{N}_i^r(t) \leq X_i^r(t) \leq \bar{N}_i^r(R, t), \underline{Y}^r(t) \leq y^r(t) \leq \bar{Y}^r(t), \quad (4.11)$$

где $\underline{N}_i^r(t)$ – ограничения на отдельные переменные снизу могут быть вызваны по социальным, стратегическим соображениям и немоделируемым факторам,

$\bar{N}_i^r(R, t)$ – ограничения на отдельные переменные сверху по возможностям мощностей (ресурсов), $\underline{Y}^r(t)$, $\bar{Y}^r(t)$ – экзогенно задаваемые уровни минимального и максимального уровня восстановления ресурсов.

Приведем смысл переменных и коэффициентов, участвующих в описании уравнений модели: $X_i^r(t)$ – объем продукции, выпускаемый i -ой отраслью в регионе r ; $z^r(t)$ – объем конечного потребления в регионе r ; $X_i^{rs}(t)$ – суммарный вывоз продукции i -ой отрасли из региона r в регион s ; $X_i^{sr}(t)$ – суммарный ввоз продукции i -ой отрасли из региона s в регион r ; $\tilde{X}_\tau^{sri}(t)$ – импорт продукции i -ой отрасли из региона s в регион r с помощью транспортной отрасли τ , $q_i^r(t)$ – объем продукции для прочих государственных нужд в регионе r , экспорт и импорт продукции, незавершенные вложения в будущие мощности и др.; $u_i^r(t)$ – инвестиции в основное производство i -ой отрасли в регионе r ; $K_i^r(t)$ – объем незавершенных вложений i -ой отрасли в регионе r ; $K_j^{r(y)}$ – объем незавершенных вложений в отрасль, восстанавливающей j -ый ресурс в

регионе r ; $y_k^r(t)$ – интенсивность экзогенного возобновления k -го ресурса (разведка, восстановление, отчистка) в регионе r ; $w^r(t)$ – инвестиции, на восстанавливающие отрасли в регионе r ; $A_{ij}^r(t)$ – элементы матрицы производственных затрат в регионе r ; $\dot{A}_{ij}^{sr}(t)$ – элементы матрицы затрат на перевозку продукции j -ой отрасли из региона s в r с помощью транспортной отрасли i ; α_i^r – доля i -ой отрасли в конечном потреблении в регионе r ; R^r – вектор, характеризующий состояние природных ресурсов и заболеваемости населения; R^{r*} – вектор невозмущенного состояния ресурсов; $A_{ij}^{(y)}(t)$ – коэффициент прямых затрат при восстановлении ресурсов, показывает количество продукта i -ой отрасли при единичной интенсивности восстановления ресурса j ; Q^r – матрица коэффициентов самовосстановления и взаимовлияния ресурсов в регионе r ; C^r – матрица удельных ресурсных затрат при выпуске продукции в регионе r ; $C^{r(L)}$ – матрица коэффициентов влияния населения на экологические показатели в регионе r ; D^r – матрица удельных ресурсных затрат при развитии основного производства в регионе r ; $D^{r(y)}$ – матрица, элементы которой показывают изменение показателя R_i^r , при единичном увеличении инвестиций в восстановление ресурса в регионе r ; J – диагональная матрица с элементами $J_{kk}=1$, если восстановление ресурса приводит к увеличению медико-экологического показателя k , в противном случае $J_{kk}=-1$; $\beta_{jj}^r(t)$ – коэффициенты амортизации j -ой отрасли в регионе r ; $\beta_{kk}^{r(y)}(t)$ – коэффициенты амортизации в отраслях восстанавливающей k -ый ресурс в регионе r .

Особенности представленной типовой модели:

1. Экономический блок учитывает как традиционные отрасли экономики, так и отрасли, восстанавливающие экологическое состояние в регионе.

2. Экологический блок рассматривает состояние экологического блока в терминах отклонения от некоторого невозмущенного (естественного) состояния.

3. Экономические и экологические показатели рассматриваются на высоком уровне агрегирования.

4. При идентификации параметров учитывается их содержательный смысл.

При моделировании в типовой модели медико-экологические показатели рассматривают агрегировано. Если для большинства показателей модели (например, площадь сельскохозяйственных угодий или запас деловой древесины) такое рассмотрение является адекватным задачам исследования, то при анализе здоровья населения в рамках этих моделей важно иметь не только агрегированное представление, но и оценить специфику районов региона, где проживает большая часть населения. Для этого необходимо, во-первых, более подробно рассматривать структуру показателей заболеваемости, и, во-вторых, исследовать показатели не на уровне региона АЧР, а на более детальном уровне (например, город). Решение этих задач становится возможным при введении в рассмотрение модели второго уровня.

4.3.2 Предметно-ориентированные методики и тиражирование

Для определения параметров системы (4.7) использован опыт построения эколого-экономических моделей Байкальского региона [20]. Особенность описанного в этой монографии подхода заключается в учете содержательного смысла параметра при его идентификации. Это означает, что для идентифицируемого параметра может быть предложена конкретная формула его определения.

Например, согласно [20] показатель *загрязнение воды* может определяться суммарной среднегодовой приведенной концентрацией примесей в воде и вычисляется следующим образом:

$$R_1 = \frac{1}{V} \sum_{i=1}^p \frac{m_i}{ПДК_i}, \quad (4.12)$$

$$R_1^* = \sum_{i=1}^p \frac{c_i^*}{ПДК_i}, \quad (4.13)$$

где p – количество учитываемых веществ; $ПДК_i$ – предельно допустимая концентрация i -го вещества; m_i – масса i -го вещества, выносимого рекой через устье за год; V – объем годового стока реки (при 95% обеспеченности); R^* характеризует невозмущенное состояние для концентрации веществ c_i^* в незагрязненной природной среде. В показателе R_1 учитываются взвешенные вещества, нефтепродукты, азот, медь, цинк, СПАВ (синтетические поверхностные активные вещества), БПК (биологическое потребление кислорода), фосфор, минеральные вещества, фенол.

Элемент матрицы C - c_{ij} - в модели (4.3.3) характеризует величину изменения ресурса i в результате выпуска отрасли j в единицу времени. Для определения элементов матрицы C , отражающих влияние экономики на загрязнение воды в [20] предложена следующая формула:

$$c_{1i} = \frac{e^{-q_{11}} t_{cp}}{V} \sum_{i=1}^p \frac{m_{ij}}{ПДК_i}, \quad (4.14)$$

$$m_{ij} = \frac{\sum_{k=1}^N m_{ij}^k}{\sum_{k=1}^N v_j^k}, \quad (4.15)$$

$$t_{cp} = \frac{1}{N^j} \sum_{k=1}^{N^j} \frac{s_k^j}{v}, \quad (4.16)$$

где m_{ij}^k – количество примеси i , сброшенной k -м предприятием j -ой отрасли за год (т/год); v_j^k – валовой выпуск k -предприятия j -ой отрасли; v – скорость

реки, s_k^j – расстояние от предприятия до устья реки, N^j – количество предприятий, V – объем реки/водоёма.

Применение процедуры тиражирования (раздел 2.3.2) для формулы (4.14) означает вычисление параметра согласно общей формуле для тиражирования (2.23) следующим образом:

$$c_{1j}^{new} = \frac{V^{base}}{V^{new}} c_{1j}^{base}, \quad (4.17)$$

где V – объем годового стока реки, индекс *new* означает принадлежность параметра к исследуемой модели, а индекс *base* – к контрольной (базовой) модели.

Для других показателей и параметров модели используются аналогичные рассуждения. Например, загрязнение атмосферного воздуха, согласно [20], характеризуется суммарным взвешенным загрязнением атмосферы региона:

$$R_2 = \sum_{i=1}^p \frac{y_i}{ПДК_i}. \quad (4.18)$$

где p – количество учитываемых веществ; y_i и $ПДК_i$ – фактическая и предельно допустимая концентрация i -го вещества. В показателе R_2 учитываются пыль, окись углерода, двуокись азота, сероводород, сажа, углеводороды, фтор, сернистый газ.

Вычисление параметров c_{2j} , характеризующих влияние производственной деятельности на состояние воздушной среды, базируется на данных о выбросах в атмосферу и о производственной мощности предприятий отрасли j :

$$c_{2j} = \sum_{i=1}^p \frac{m_i}{w \cdot v_j \cdot ПДК_i}, \quad (4.19)$$

где w – объем нижнего слоя атмосферы района (m_3);

m_i – выброс i -го вещества в год (мг/год) предприятиями отрасли j ;

v_j – стоимость продукции, выпускаемой отраслью j в год.

Если в распоряжении исследователя имеются данные о выбросах и выпуске продукции конкретных предприятий в рассматриваемом районе, то параметры c_{2j} могут вычисляться на основе более детальной информации [20]:

$$c_{2j} = \frac{\sum_{p=1}^{k_j} a_p^i b_p^j c_{2j}^p}{\sum_{p=1}^{k_j} a_p^i b_p^j}, \quad (4.20)$$

где k_j – число предприятий j -ой отрасли, выделенных в качестве типичных при расчете коэффициентов;

a_p^i – характеристика типичности предприятия p , т.е. число подобных организаций и предприятий в районе;

b_p^j – стоимость продукции, выпускаемой предприятием p ;

c_{2j}^p – значение коэффициента влияния на воздух для предприятия p .

Тиражирование параметров модели определенных по формулам (4.19) осуществляется следующим образом:

$$c_{2j}^{new} = \frac{w^{base}}{w^{new}} c_{2j}^{base}. \quad (4.21)$$

4.3.3 Эколого-экономическая модель России

Постановка задачи. Для моделирования были выбраны две территории: Азиатская и Европейская части России с системой показателей по экономическому и экологическому блоку. В модели рассматриваются следующие отрасли экономики: тяжелая промышленность, добыча нефти, легкая промышленность, строительство, лесная отрасль и сельское хозяйство, транспорт и связь, торговля, прочие отрасли. Экологический блок учитывает следующие показатели: загрязнение воды (доли ПДК); загрязнение атмосферного воздуха (доли ПДК); средний запас леса (мЗ/га); площадь

сельскохозяйственных земель (га); запасы биоресурсов (тыс. руб.);, запасы минеральных ресурсов (тыс. руб.). Медицинский блок для данной реализации модели не учитывался из-за проблемы с информационным наполнением. Данная модель частично рассматривается в работе [8].

Для определения параметров межотраслевой динамической модели эксперты-экономисты из ИЭОПП СО РАН (Института экономики и организации промышленного производства) и эксперты-историки из ОИИФФ СО РАН (Объединенного института истории, филологии и философии) провели исследования экономического развития страны (СССР/Россия) с 1889 по 1989 годы. Использование статистических данных, находящихся в открытом доступе, напрямую, без их критического анализа, для определения параметров модели не представляется возможным из-за значительного количества приписок и неточностей. Поэтому экспертами была проведена большая работа по анализу и обработке статистических данных за 100 лет, а получаемые на их основе параметры модели подвергались тщательному исследованию.

Параметры определялись в периоды времени с 1889 по 1989 годы с интервалом в 10 лет. В качестве базового периода анализа принят 1959 г. (год, для которого был разработан межотраслевой баланс). В общем случае можно взять любой год, который будет соответствовать периоду коренных изменений в экономике страны. Выделение таких «ключевых» моментов – задача экспертов-историков. Для других периодов сохраняется общая структура моделей, но их наполнение коэффициентами материальных, трудовых и капитальных затрат меняется в соответствии с решениями, принимаемыми в предыдущий период. В результате такой экспертной «реконструкции» исторических событий восстанавливаются параметры моделей.

Для экологического блока предложены подходы к идентификации параметров моделей, основанные на данных «восстановленного» экспертами

межотраслевого баланса и результатах идентификации существующих эколого-экономических моделей Байкальского региона [20].

Для переноса информации с моделей Байкальского региона на модель макрорегиона были решены следующие задачи:

1. Приведение данных в единые цены базового периода.
2. Соотношение системы отраслей в двух моделях.
3. Масштабирование объемов отраслей с базовых регионов на макрорегион.

Параметры экологического блока модели Азиатской части России (АЧР) были определены по предметно-ориентированным методикам с использованием процедуры тиражирования, где в качестве контрольных регионов выступали Иркутская область и Республика Бурятия.

Результаты расчетов. При исследовании альтернатив развития АЧР был рассмотрен базовый сценарий, соответствующий «реконструированной» экспертами исторически наблюдавшейся экономической ситуации в период с 1959 года по 1989 год. Параметры и управления базового сценария определялись из реальных данных, где это было возможно, и при помощи математической модели межотраслевого баланса.

В результате реализации базового сценария происходит активное экономическое развитие АЧР, что приводит к естественному в этом случае уменьшению запасов природных ресурсов и ухудшению экологической ситуации (увеличения загрязнения воздуха). Такая ситуация приводит к тому, что в рассматриваемом далее сценарии «сдвиг на запад» основной акцент будет уделен анализу «упущенных возможностей» по уменьшению дефицита в производстве продукции отраслей легкой промышленности и уменьшению экологической нагрузки на природную среду АЧР за счет снижения выпуска продукции отраслью тяжелой промышленности.

Сценарий «сдвиг на запад» реализует альтернативный вариант развития АЧР и ЕЧР в период с 1959 по 1989 годы. Этот сценарий основан на предложенной сотрудниками Института истории СО РАН (Новосибирск) и

Института экономики и организации промышленного производства СО РАН (Новосибирск) концепции альтернативного развития СССР в период 1949 – 2009 г, главной идеей которой является более интенсивное развитие ЕЧР и более слабое развитие АЧР.

В период реализации сценария «сдвиг на запад» это, в частности, выражается в значительном снижении производства продукции тяжелой промышленности в АЧР и развитие данной отрасли в ЕЧР за счет собственных и экспортных природных ресурсов (рисунок 4.6).

Важной гипотезой сценария является то, что нефть была бы найдена не в АЧР, а в ЕЧР (рисунок 4.7), однако объемы добычи существенно меньше, чем были в базовом сценарии для АЧР. Динамика выпусков в остальных отраслях экономики ЕЧР отличаются от базового сценария незначительно.

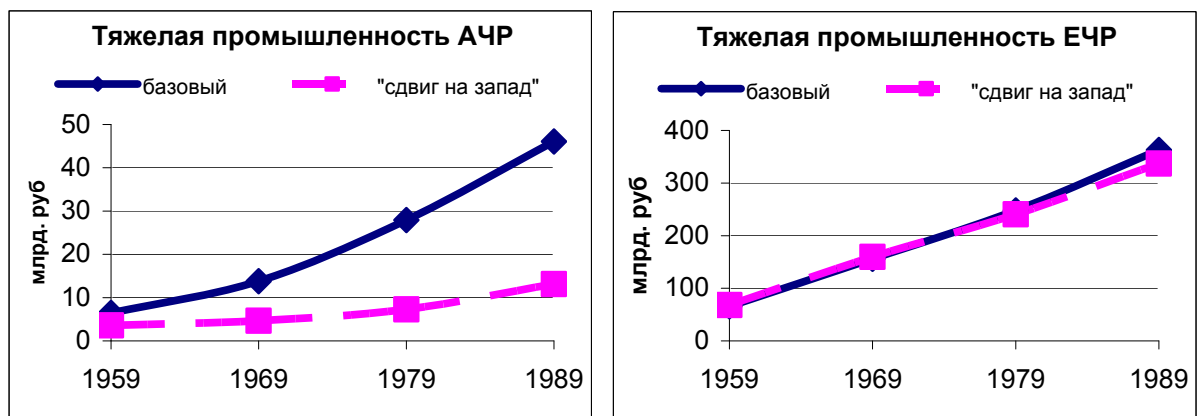


Рисунок 4.6 – Динамика выпуска в тяжелой промышленности в АЧР и ЕЧР

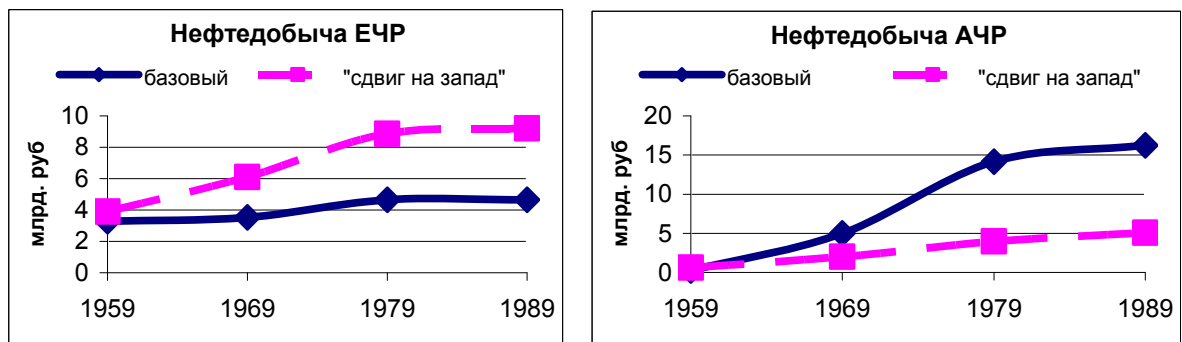


Рисунок 4.7 – Динамика нефтедобычи в АЧР и ЕЧР

Население АЧР ввиду отсутствия стимулирования миграционных процессов растет естественным темпом, оставаясь на незначительном уровне по сравнению с базовым сценарием.

По сравнению с базовым сценарием в рассматриваемом сценарии для АЧР заложено более интенсивное развитие легкой промышленности (рисунок 4.8), что должно способствовать сокращению дефицита продукции отраслей легкой промышленности, а также стимулировать развитие высокотехнологичных отраслей экономики.

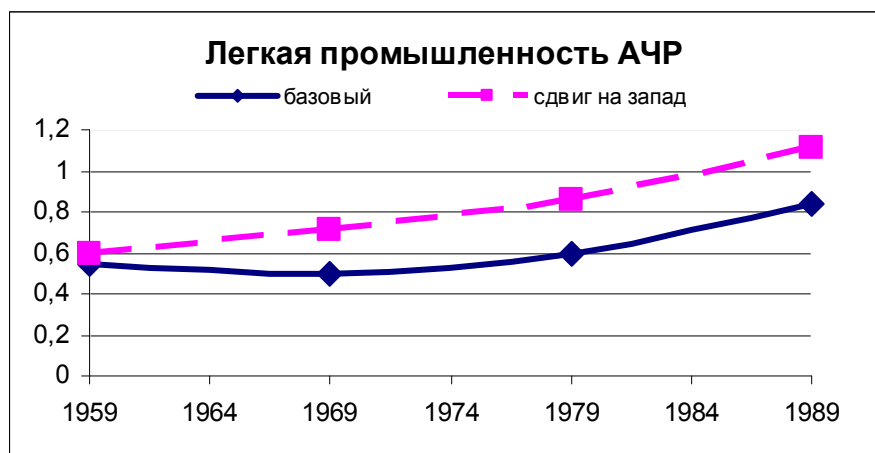


Рисунок 4.8 – Динамика выпуска в легкой промышленности в АЧР

В АЧР при реализации сценария «сдвиг на запад» наблюдается благоприятная экологическая ситуация: природная среда не эксплуатируется экстенсивно, полезные ископаемые сохраняются для их использования последующими поколениями (рисунок 4.9) Это создает возможности для интенсивного развития АЧР в будущем.

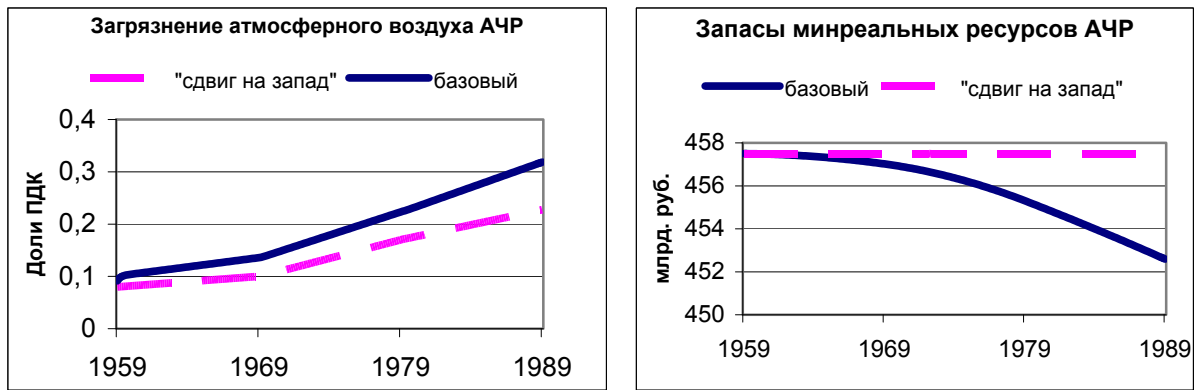


Рисунок 4.9 – Динамика экологических показателей АЧР

В Европейской части экологическое состояние достигает неблагоприятного уровня быстрее, чем в базовом (Рис. 4.3.5.), что приводит к необходимости ограничения выпуска в тяжелой промышленности в середине 70-ых годов (рисунок 4.10).

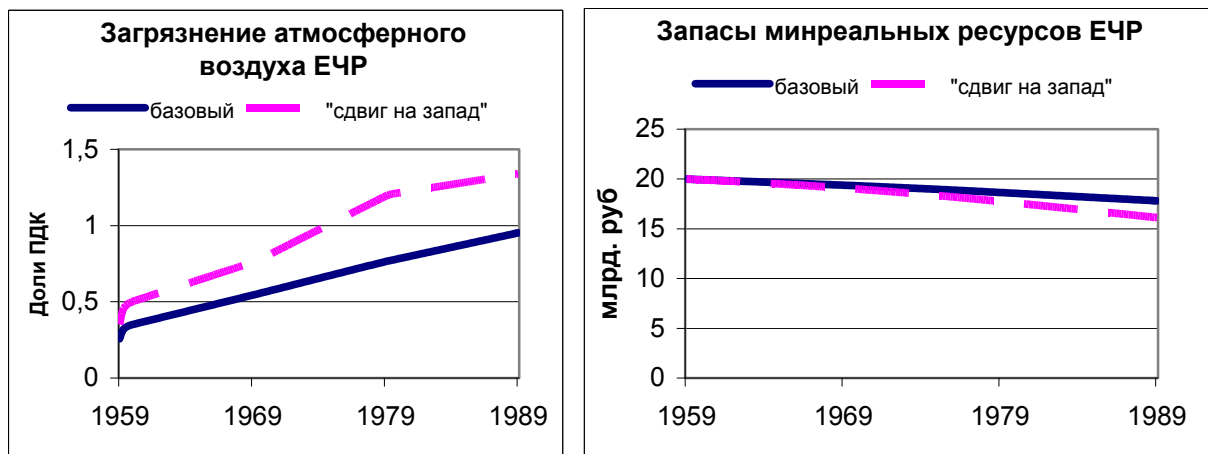


Рисунок 4.10 – Динамика экологических показателей ЕЧР

Для рассматриваемого сценария «сдвиг на запад» удалось подтвердить утверждение, что развитие отраслей тяжелой промышленности преимущественно в ЕЧР оказывает значительное негативное воздействие на состояние окружающей среды. Поэтому экономическое освоение АЧР является обоснованным не только с экономической, но и с экологической точки зрения.

4.3.4 Медико-эколого-экономические модели регионов Азиатской части России

Постановка задачи. Рассмотрим использование типовой модели для формирования моделей некоторых регионов Азиатской части России, где, в отличие от предыдущего раздела, введены показатели заболеваемости населения и расширен состав отраслевой структуры экономического блока [1].

Для характеристики медико-экологического состояния используются 8 показателей (таблица 4.11), а экономический блок описывается следующей 38-отраслевой структурой: электроэнергетика, нефтедобывающая промышленность, нефтеперерабатывающая промышленность, газовая промышленность, угольная промышленность, прочее топливо, черная металлургия (добыча), черная металлургия (переработка), цветная металлургия (добыча), цветная металлургия (переработка), химическая промышленность основная, химико-органический синтез, машиностроение, лесозаготовки, деревообрабатывающая промышленность, целлюлозно-бумажная промышленность, промышленность стройматериалов, легкая промышленность, швейная промышленность, прочие легкой промышленности, мясомолочная промышленность, рыбная промышленность, прочие пищевой промышленности, мукомольная промышленность, прочие отрасли промышленности, строительство, растениеводство, животноводство, связь, торговля, материально-техническое снабжение, финансовая сфера, непроеизводственные, прочие отрасли народного хозяйства, ж.д. транспорт, автомобильный транспорт, трубопроводный транспорт, внутренний водный транспорт и лесосплав, авиационный транспорт, морской транспорт, погрузочно-разгрузочный транспорт, проч. транспорт (шоссейное хозяйство, городской электротранспорт).

Модель разрабатывалась для следующих 15 регионов: Уральский Федеральный Округ (без Тюменской области), Томская область, Иркутская область, Дальневосточный Федеральный Округ, Кемеровская область, Новосибирская область, Алтайский край, Красноярский край, Республика Алтай, Республика Бурятия, Республика Тыва, Республика Хакасия, Омская область, Читинская область, Тюменская область.

Таблица 4.11 – Показатели медико-экологического блока модели

Показатель	Наименование показателя	Единицы измерения	Характеристика показателя
R_1	Загрязнение воды	сумма долей пдк	взвешенные вещества, нефтепродукты, азот, медь, цинк, СПАВ, БПК, фосфор, минеральные вещества, фенол.
R_2	Загрязнение атмосферного воздуха	сумма долей пдк	пыль, окись углерода, двуокись азота, сероводород, сажа, углеводороды, фтор, сернистый газ.
R_3	средний запас леса	м ³ /га	
R_4	Площадь сельскохозяйственных земель	Га	площадь угодий, пашен, пастбищ, сенокосов, выгонов и др.
R_5		тыс. руб.	дикорастущие, промысловая пушнина, мясо диких животных, лекарственное сырье, боровая дичь, рыба.
R_6	запасы минеральных ресурсов		
R_7	общая заболеваемость	обращаемость на 1000	
R_8	заболеваемость органов дыхания	человек	

Для определения параметров модели на основе алгоритма тиражирования была использована разнообразная статистическая информация. Например, данные о площади регионов для пересчета

площадных параметров модели; данные об объемах выбросов в атмосферу и в водоемы использовались для пересчета начальных значений показателя загрязнения воздуха и воды и соответствующих коэффициентов модели; данные об объеме деловой древесины и площадь леса для определения среднего запаса леса на гектаре; данные о выбросах наиболее распространенных загрязняющих атмосферу веществ, отходящих от стационарных источников, в ряде городов с наиболее неблагоприятной экологической обстановкой для пересчета параметра влияния загрязнения атмосферного воздуха на заболеваемость населения. Эти данные можно найти в серии сборников, выпускаемых Федеральной службой государственной статистики. Также использовались данные об объеме стока воды в оценка национального богатства недр России по группам основных видов полезных ископаемых и категориям богатства недр.

Для идентификации матриц Q и C моделей регионов Азиатской части России было использовано тиражирование значений параметров модели. Пример пересчета параметров матрицы C для некоторых регионов (базовый регион для них – Республика Бурятия) представлен в таблице 4.12.

Таблица 4.12 – Тиражирование матрицы C

Элемент	Регион	Общий коэффициент масштабирования
c_{1j}	Красноярский край	9,6
	Новосибирская область	0,5
	Томская область	0,76
c_{2j}	Красноярский край	6,7
	Новосибирская область	0,5
	Томская область	0,9
c_{3j}	Красноярский край	7
	Новосибирская область	0,3
	Томская область	1,3

Для определения коэффициента влияния загрязнений атмосферного воздуха на общую заболеваемость населения и заболеваемость органов дыхания $q_{2,8}$ и $q_{2,7}$ используются экспертные оценки, рекомендованные Всемирной организацией здравоохранения [16].

Результаты расчетов. Базовый сценарий отражает сложившуюся в регионах АЧР экономическую ситуацию. В рассматриваемом базовом сценарии описывается взаимосвязанное развитие регионов АЧР в период с 2005 по 2015 годы. Данный сценарий формировался на основе существующих стратегий развития регионов, программ реконструкции и развития отдельных предприятий, предложений экспертов. Медико-экологический блок в данном сценарии является пассивным, т.е. отсутствуют изменения в инвестициях на восстановление медико-экологических показателей, а сами показатели не ограничиваются. Медико-экологический блок в этом случае использовался для мониторинга реакции природной среды и заболеваемости населения на антропогенное воздействие

В результате анализа базового сценария в АЧР были выявлены регионы с неблагоприятной медико-экологической обстановкой. Для ее улучшения был сформирован *сценарий экологического развития регионов АЧР*, который предполагает значительное снижение выпуска по отраслям экономики, оказывающим наиболее существенный вклад в общую экологическую нагрузку. Для этого в рассматриваемый сценарий вводят новые ограничения на выпуски, зависящие теперь как от возможности мощностей, так и от значений $R^r(t)$, что означает, уже активное влияние медико-экологического блока на решение задачи.

В таблице 4.13 представлено подробное описание сценария экологического развития регионов АЧР. В ней приведены наименования отраслей, для которых формируются новые ограничения; значения новых и старых ограничений на выпуск продукции; а также экологический показатель, из-за которого возникает ограничение.

Таблица. 4.13 – Ограничения в сценарии развития для некоторых регионов АЧР

Регион	Экологический показатель, определяющий ограничение	Отрасль	Ограничение на выпуск (млрд. руб.)	
			Базовый сценарий	Экологический сценарий
Красноярский край	Загрязнение воздуха	Электроэнергетика	68,3	58,5
		Нефтеперерабатывающая промышленность	134,257	115
		Химическая промышленность основная	3,5	3
		Целлюлозно-бумажная промышленность	6,3	5,4
Томская область	Средний запас леса	Лесозаготовки	9,5	8,68
Новосибирская область	Загрязнение воздуха	Электроэнергетика	41,6	38,5
		Машиностроение	109	100,86
		Цветная металлургия (переработка)	125,9	116,55
		Нефтеперерабатывающая промышленность	111,24	107,1
Иркутская область	Загрязнение воздуха	Электроэнергетика	52,8	45,35
		Нефтеперерабатывающая промышленность	47,96	41,2
		Химическая промышленность основная	2,89	2,48
		Химико-органический синтез	8,3518	7,17
	Средний запас леса	Лесозаготовки	35	24,5
		Деревообрабатывающая промышленность	13	7
		Целлюлозно-бумажная промышленность	43	29
Бурятия	Загрязнение воздуха	Электроэнергетика	3,89	3,72
		Угольная промышленность, прочее топливо	7,15	6,83
		Промышленность стройматериалов	2,7	2,56

Несмотря на то, что ограничения по выпускам для конкретной отрасли могут быть вызваны разными медико-экологическими показателями, в описании сценария указаны именно те, значения которых оказались минимальными. Например, в модель заложена гипотеза, что показатели заболеваемости населения существенно зависят от загрязнений атмосферного воздуха, поэтому снижение последнего показателя приводит и к нормализации состояний здоровья населения. При реализации экологического сценария конечное потребление в России получилось равным 27988, а в базовом сценарии 29206,85, т.е. происходит уменьшение потребления на 4%. При этом экологическая ситуация по таким показателям как загрязнение атмосферного воздуха, заболеваемость населения, загрязнение воды и средний запас леса в среднем улучшается на 15-20%. Следует отметить, что базовым значением для уменьшения выпусков является не верхнее ограничение $\bar{N}_j(t)$, а текущий выпуск, так как исходные ограничения в базовом сценарии для некоторых отраслей оказались не активными.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Междисциплинарный характер проблемы исследования региональных медико-эколого-экономических систем, отсутствие возможностей постановки активного эксперимента со всей изучаемой системой и недостаточность имеющихся данных наблюдений (как за отдельными подсистемами, так и за взаимодействием подсистем) приводит к проблемам в использовании стандартных методов исследования, применяемых при изучении технических или физических объектов.

Общий алгоритм построения математической модели динамической системы, используемый для исследования региональных медико-эколого-экономических систем, предполагает использование линейных математических соотношений в структуре модели; специальных методов параметрической идентификации, основанных на концепции идеализированного эксперимента; методов искусственного интеллекта для имитации условий экспериментов, а также для поддержки процесса формирования моделей на этапах анализа данных, параметрической идентификации и многовариантных расчетов.

Преимущества использования линейных моделей заключается в следующем:

1. Увеличение наглядности модели, что важно для возможности содержательной интерпретации параметров с точки зрения экспертов-предметников.
2. Упрощенное рассмотрение системы, так как взаимодействие ее подсистем слабо изучено.
3. Богатый выбор математического аппарата для анализа и проведения расчетов по моделям.

Специальные методы параметрической идентификации (компонентные эксперименты и тиражирование) позволяют использовать для определения

коэффициентов модели данные наблюдений не над всей системой в целом, а на исследовании отдельных подсистем и их взаимодействия.

Моделирование данных, удовлетворяющих условиям компонентных экспериментов, осуществляется как преобразование доступных исходных данных на основе закономерностей из соответствующих компонентам модели предметных областей, формализованных в логических (продукционных) правилах.

Алгоритм «тиражирования» медик-эколого-экономических моделей предполагает использование информации об известных параметрах моделей контрольных регионов для определения неизвестных параметров модели исследуемого региона при применении предметно-ориентированных методик. Данный алгоритм применяется при создании прототипов моделей в процессе исследования многорегиональных систем. При тиражировании выбираются регионы схожие по тем своим характеристикам (численность населения, уровень развития отрасли экономики и др.), которые оказываются важными для рассматриваемого параметра и соответствующей предметно-ориентированной методики.

Применение методов искусственного интеллекта, формализация знаний экспертов-предметников и специалистов по математическому моделированию позволило создать информационную методику поэтапного интерактивного формирования и исследования моделей медико-эколого-экономических систем на основе алгоритмов, описанных в главе 2. Применение методики актуально, когда исследуется не один, а несколько регионов, и такое исследование осуществляется в условиях дефицита информации. Кроме того, методика востребована, если требуется в достаточно короткий срок сформировать модели и выполнить расчеты, но при этом отсутствует возможность собрать достаточное количество экспертов или данных наблюдений в выделенный для разработки модели период.

Целью применения методики является трансформация информационно-логическое описание предметной области (ЛОПО) в информационно-логическое описание объектов и методов моделирования (ЛООММ). В процессе трансформации используются такие средства как вычислительные процедуры, логические (продукционные) правила и процедуры доступа к данным. Эти средства для удобства обработки группируются в процедуры формирования модели (ПФМ). Применение такой информационной структуры как ПФМ позволяет задавать связь между формализованными вычислительными процедурами и неформализованными методами решения задач, основанными на знаниях и опыте экспертов.

Реализация методики осуществляется в рамках разработанного интеллектуального программного комплекса (ИПК) «МЭЭМ», который используется для поддержки процесса исследования региональных медико-эколого-экономических систем.

Основными модулями ИПК «МЭЭМ» являются следующие:

1. Расчет: выполняет основные вычисления в процессе формирования модели, предназначен для реализации вычислительных процедур ПФМ.

2. Расчет–CLIPS: осуществляет логический вывод с использованием механизмов системы CLIPS. Вызывает вычислительные процедуры, реализованные в Расчет.

При разработке ИПК «МЭЭМ» использовались следующие свободно распространяемые программные средства: Clips, Protege, Twiki, Eclipse. Тестирование ИПК «МЭЭМ» выполнялось на операционных системах семейства Windows.

Таким образом, методика поэтапного интерактивного формирования и исследования моделей, включая процедуры формирования моделей (на основе результатов главы 2), и ИПК «МЭЭМ» образуют методическое, алгоритмическое и программное обеспечение интеллектуальной поддержки исследования региональных медико-эколого-экономических систем.

Предложенное в диссертации методическое, алгоритмическое и программное обеспечение поддержки исследования региональных медико-эколого-экономических систем было использовано для анализа медико-эколого-экономической ситуации в регионах разного уровня: города, области и макрорегиона (Азиатской части России).

Эколого-экономические процессы города описывает модель динамики заболеваемости населения г. Ангарска Иркутской области. Для данной модели на основе результатов эпидемиологических исследований были смоделированы данные для проведения компонентных экспериментов и определены параметры модели Q и C . Проведен сценарный анализ, предполагающий улучшение экологической обстановки в городе за счет внедрения природоохранных мероприятий на крупных предприятиях, загрязняющих атмосферный воздух. Для наблюдаемого в сценарии снижения уровня заболеваемости получена экономическая оценка.

Эколого-экономическая модель России описывает развитие страны с 1889 по 1989. Исходный вариант экономической модели был разработан сотрудниками Института экономики и организации промышленного производства (ИЭОПП СО РАН) и Объединенного института истории, филологии и философии. Параметры экологического блока модели Азиатской части России (АЧР) были определены по предметно-ориентированным методикам с использованием процедуры тиражирования, где в качестве контрольных регионов выступали Иркутская область и Республика Бурятия. Вычислительные эксперименты с моделью были проведены с использованием процедур создания сценариев на основе системы стандартных сценариев. Таким образом, существующий вариант экономической межотраслевой модели СССР был развит до эколого-экономической.

Сценарный анализ эколого-экономической модели позволил подтвердить гипотезы, принятые еще в исходной экономической модели. В частности расчеты показали, что развитие отраслей тяжелой

промышленности преимущественно в Европейской части России оказывает значительное негативное воздействие на состояние окружающей среды. Поэтому экономическое освоение АЧР является обоснованным не только с экономической, но и с экологической точки зрения.

Медико-эколого-экономические модели регионов АЧР являются развитием экономических моделей, разработанных в ИЭОПП СО РАН. На основе расчетов по сформированным МЭЭМ были установлены ограничения на выпуски отраслей для сценария эколого-экономического развития регионов АЧР для много региональной экономической модели. Расчеты по сценарию позволили установить величину снижения в конечном потреблении для улучшения экологической обстановки в регионах АЧР.

Основными результатами работы являются:

1. Алгоритмы определения параметров моделей управляемых медико-эколого-экономических систем на основе обработки формализованной экспертной информации о закономерностях в предметной области с учетом специфики региона.
2. Методическое, алгоритмическое и программное обеспечение интеллектуальной поддержки исследования региональных медико-эколого-экономических систем, позволяющее проводить их многовариантный сценарный анализ с использованием процедур системного анализа и технологии математического моделирования.
3. Медико-эколого-экономические модели и сценарные расчеты на основе задания различных вариантов управления (инвестиций) для Иркутской области, Республики Бурятия и Азиатской части России, а также для города Улан-Батор (Монголия).

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ

ВП – вычислительные процедуры

ИПК – интеллектуальный программный комплекс

ИЭС – интегрированная экспертная система

ЛООММ - информационно-логическое описание объектов и методов моделирования

ЛОПО – информационно-логическое описание предметной области

ЛПР – лицо принимающее решение

ПАМ - простая архитектура моделирования

ПДД – процедуры доступа к данным

ПК – программный комплекс

ПОМ – программные объекты модели

ПП – продукционные правила

ППП – пакет прикладных программ

ПФМ – процедуры формирования моделей

РГНФ - Российский гуманитарный научный фонд

РФФИ - Российский фонд фундаментальных исследований

САМ – средства автоматизации моделирования

ЭС – экспертная система

CLIPS – C Language Integrated Production System

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Азиатская часть России: моделирование экономического развития в контексте опыта истории / отв ред. В. А. Ламина, В.Ю. Малов. - Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2012. 464 с.
2. Айвазян, С.А. Прикладная статистика и основы эконометрики / С.А. Айвазян, В.С. Мхитарян. – М.: ЮНИТИ, 1998. – 1022 с.
3. Антоновский, М.Я. Методология построения балансовых эколого-экономических моделей / М.Я. Антоновский, В.А. Литвин, М.Т. Тер-Микаэлян // Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем. – Л.: Гидрометеиздат, 1980. – Т.3. – 229 с.
4. Антопченко, Т.Ю. Разработка эконометрической модели оценки регионального экономического ущерба здоровью населения / Т.Ю. Антопченко, А.Ю. Пашкова // Региональная экономика: теория и практика. – 2003. – № 10. – С. 116-120.
5. Антопченко, Т.Ю. Эколого-экономические риски урбанизированных территорий: концепция, причины, последствия: дис.: ... доктора экономических наук: 08.00.05 / Антопченко Татьяна Юрьевна. – Ростов-на-Дону, 2008. – 370 с.
6. Барвинко, Н. Г. Состояние атмосферного воздуха и здоровье населения Удмуртии – автореф. дис. ... д-ра мед. наук: 03.00.16 / Барвинко Надежда Григорьевна. – Архангельск, 2007. – 52 с.
7. Батурин, В.А. Использование математического моделирования при идентификации экологически обусловленных заболеваний / В.А. Батурин, Н.В. Ефимова, А.Б. Столбов, Д.Е. Урбанович // Бюллетень Восточно-Сибирского научного центра СО РАМН. – 2005. – №8. – С. 11-15.
8. Батурин, В.А. Сценарный анализ эколого-экономического развития Азиатской части России / В.А. Батурин, В.В. Воробьева, В.Ю.

Малов, Б.В. Мелентьев, А.Б. Столбов // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2009. – № 4. – С. 13-18.

9. Батурин, В.А. Система сценариев для анализа развития байкальского региона на основе медико-эколого-экономических моделей / В.А. Батурин, В.Ю. Малов, Б.В. Мелентьев, А.Б. Столбов [Электронный ресурс] // Известия Иркутской государственной экономической академии (Байкальский государственный университет экономики и права) (электронный журнал). – 2010. – № 4. – С. 228-233. – URL: <http://eizvestia.isea.ru/pdf.aspx?id=11951> (дата обращения: 15.05.2016).

10. Батурин, В.А. Применение медико-эколого-экономических моделей для прогнозирования динамики заболеваемости населения / В.А. Батурин, Н.В. Ефимова, В.Ю. Малов, Б.В. Мелентьев, А.Б. Столбов // Информатика и системы управления. – № 2. – 2010. – С. 199-202

11. Батурин, В.А. Опыт математического моделирования загрязнения атмосферного воздуха и частоты заболеваний органов дыхания у населения Улан-батора / В.А. Батурин, Н.В. Ефимова, С. Будням, А.Б. Столбов, Н.С. Малтугуева, Т.А. Елфимова // Успехи современного естествознания. – 2016. – № 3. – С. 136-140.

12. Бесстремьянная, Г.Е. Вычислимая модель «Социальная Россия» / Г.Е. Бесстремьянная, А.Р. Бахтизин. – М.: ЦЭМИ РАН, 2004. – 64 с.

13. Борщев, А.В. Практическое агентное моделирование и его место в арсенале аналитика / А.В. Борщев // Exponenta Pro. Математика в приложениях. – 2004. – № 3. – С.38-47.

14. Бусленко, Н.П. Моделирование сложных систем / Н.П. Бусленко. – М.: Наука, 1978. – 356 с.

15. Взаимодействие природы и хозяйства Байкальского региона / А.К. Айламазян, В.И. Гурман, Э.Е. Дроздовский и др. – Новосибирск: Наука, 1981. – 127 с.

16. ВОЗ, Всемирная организация здравоохранения [Электронный ресурс]: офиц. сайт. – Загл. с экрана. – URL: <http://www.who.int/ru/> (дата обращения: 15.05.2016).
17. Гроп, Д. Методы идентификации систем / Д. Гроп. – М.: Мир, 1979. – 684 с.
18. Гурман, В.И. Принцип расширения в задачах управления / В.И. Гурман. – М.: Наука, 1985. – 288 с.
19. Гурман, В.И. Эколого-экономические системы: Модели, информация, эксперимент / В.И. Гурман, В.А. Дыхта, Н.Ф. Кашина и др. – Новосибирск: Наука, 1987. – 216 с.
20. Гурман, В.И. Эколого-экономическая стратегия развития региона: Математическое моделирование и системный анализ на примере Байкальского региона / В.И. Гурман, В.Е. Викулов, Е.В. Данилина и др. – Новосибирск: Наука, 1990. – 184 с.
21. Гурман, В.И. Магистральные решения в процедурах поиска оптимального управления / В.И. Гурман // Автоматика и телемеханика. – 2003. – № 3. – С. 61-71.
22. Гурман, В.И.. Магистральные решения в задачах оптимизации стратегий развития регионов / В.И. Гурман, М.Ю. Ухин // Автоматика и телемеханика. – 2004. – № 4. – С. 108–117.
23. Гурман, В.И. Оценка параметров модели региона на основе идеализированных экспериментов / В.И. Гурман, Д.Ц. Будаева, С.Н. Насатуева, А.Б. Столбов // Вестник Бурятского государственного университета. – 2014. – № 9-1. – С. 26-34
24. Джексон, Питер. Введение в экспертные системы: учеб. пособие / Питер Джексон. – М.: Вильямс, 2001. – 624 с.
25. Дубровский, С.В. О построении оптимального экономического плана / С.В. Дубровский, А.Н. Дюкалов, Ю.Н. Иванов, В.В. Токарев, А.П. Уздемир, Ю.М. Фаткин // Автоматика и телемеханика. – 1972. – № 8. – С. 100-114.

26. Дубровский, С.В. Экологические последствия альтернатив социально-экономического развития России в переходный период / С.В. Дубровский, А.Ф. Миронычев, С.Н. Осипов // Проблемы окружающей среды и природных ресурсов. Обзорная информация. – М.: ВИНТИ, 1994. – №5.

27. Дюкалов, А.Н. Теория управления и экономические системы. I. Проблема описания / А.Н. Дюкалов, Ю.Н. Иванов, В.В. Токарев // Автоматика и телемеханика. – 1974. – №5. – С. 117-132.

28. Дюкалов, А.Н. Теория управления и экономические системы. II. Качественные особенности. Схемы управления / А.Н. Дюкалов, Ю.Н. Иванов, В.В. Токарев // Автоматика и телемеханика. – 1974. – №6. – С. 69-89.

29. Елфимова, Т.А. Оценка влияния загрязнения атмосферного воздуха города Улан-Батора на заболеваемость населения / Т.А. Елфимова, Н.В. Ефимова, В.А. Батурин, С. Будням, Н.С. Малтугуева, А.Б. Столбов // Известия Самарского научного центра РАН. – 2014. – Т. 16, № 5. – С. 853-856.

30. Ефимова, Н.В. Разработка программной системы моделирования динамики заболеваемости населения / Н.В. Ефимова, А.Б. Столбов, Д.Е. Урбанович // Вестник ТГУ. Приложение. – 2006. – № 18. – С. 161-166.

31. Иванова, Ю. Д. Воздействие факторов окружающей среды на заболеваемость злокачественными новообразованиями: особенности пространственно-временных связей (на примере г. Красноярска) – автореф. дис. ... канд. тех. наук: 05.13.01 / Иванова Юлия Дмитриевна. – Красноярск, 2002. – 24 с.

32. Исследования многорегиональных экономических систем: опыт применения оптимизационных межрегиональных межотраслевых систем / под ред. В.И. Сулова. – Новосибирск: ИЭОПП СО РАН, 2007. – 250 с.

33. Каменев, Г.К. Об одном методе исследования незамкнутых нелинейных моделей / Г.К. Каменев, Д.Л. Кондратьев // Математическое моделирование. – 1992. – № 3. – С. 105-118.

34. Квейд , Э. Анализ сложных систем / Э. Квейд. – М.: Сов. радио, 1969. – 520 с.
35. Колесов, Ю.Б. Объектно-ориентированное моделирование сложных динамических систем / Ю.Б. Колесов. – СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2004. – 240 с.
36. Кротов, В.Ф. Методы и задачи оптимального управления / В.Ф. Кротов, В.И. Гурман. – М.: Наука, 1973. – 466 с.
37. Круглински, Д. Программирование на Microsoft Visual C++ 6 для профессионалов / Д. Круглински, С. Уингоу, Дж. Шеферд. – СПб: Питер; 2002. – 894 с.
38. Леонтьев, В. Межотраслевой анализ воздействия структуры экономики на окружающую среду / В. Леонтьев, Д. Форд. // Экономика и математические методы. – 1972. – Т. 8. Вып. 3. – С. 370-399.
39. Леонтьев, В. Межотраслевая экономика: пер. с англ. / В. Леонтьев. – М.: Экономика, 1997. – 479 с.
40. Лопатников, Л.И. Экономико-математический словарь: словарь современной экономической науки / Л.И. Лопатников. – 5-е изд., перераб. и доп. – М.: Дело, 2003. – 520 с.
41. Люгер, Джордж Ф. Искусственный интеллект: стратегии и методы решения сложных проблем / Джордж Ф. Люгер. – 4-е изд. – М.: Вильямс, 2003. – 864 с.
42. Макаров, В.Л. Вычислимая модель российской экономики RUSEC [Электронный ресурс] / В.Л. Макаров. – препринт № WP/99/069. – М.: ЦЭМИ РАН, 1999. – URL: <http://data.cemi.rssi.ru/GRAF/center/methodology/macroeconom/2/rusec.pdf> (дата обращения: 15.05.2016). – 93 с.
43. Машинцов, Е.А. Оценка влияния экологических факторов окружающей среды на состояние здоровья населения антропогенно-нарушенных территорий на базе системного подхода – автореф. дис. ... д-ра тех. наук: 03.00.16 / Машинцов Евгений Арсеньевич. – Тула, 2007. – 39 с.

44. МВТУ, Программный комплекс «Моделирование в технических устройствах» [Электронный ресурс]: офиц. сайт. – Загл. с экрана. – URL: <http://mvtu.power.bmstu.ru> (дата обращения: 15.05.2016).
45. Медоуз, Д.Х. Пределы роста / Д.Х. Медоуз, Д.Л. Медоуз, Й. Рандерс, В.В. Бернес. – М.: Изд-во Моск. ун-та, 1991. – 206 с.
46. Медоуз Д.Х. Пределы роста. 30 лет спустя: учебные пособие для вузов / Д.Х. Медоуз, Д.Л. Медоуз, Й. Рандерс. – М.: Академкнига, 2007. – 342 с.
47. Месарович, М. Теория иерархических систем многоуровневых систем / М. Месарович, Д. Мако, И. Такахара. – М.: Мир, 1973. – 344 с.
48. Модели природных систем / под. ред. В. И. Гурмана. – Новосибирск: Наука, 1978. – 224 с.
49. Модели управления природными ресурсами / Под ред. В.И.Гурмана. М.: Наука, 1981. – 264 с.
50. Моделирование и оценка состояния медико-эколого-экономических систем / под ред. Батурина В. А. – Новосибирск: Наука, 2005. – 249 с.
51. Моделирование социо-эколого-экономической системы региона / под ред. В. И. Гурмана, Е. В. Рюминой. – М.: Наука, 2001. – 175 с.
52. Моисеев, Н. Н. Математические задачи системного анализа / Н. Н. Моисеев. – М.: Наука, 1981. – 487 с.
53. Осуга, С. Обработка знаний / С. Осуга – М.: Мир. 1989. – 293 с.
54. Павлов, А.И. Программный комплекс для поддержки моделирования медико-эколого-экономических систем / А.И. Павлов, А.Б. Столбов // Программные продукты и системы. – 2011. – № 1. – С. 137-140.
55. Пашкова, А.Ю. Оценка ущерба здоровью в системе приоритетов гармонизации интересов экономического развития и обеспечения экологической безопасности / А.Ю. Пашкова // Проблемы современной экономики. – 2008. – № 1 – С. 417-419.

56. Пашкова, А.Ю. Оценка ущерба от загрязнения окружающей среды в системе экологически безопасного развития экономики России – автореф. дис. ... канд. экон. наук: 08.00.05, 08.00.13 / Пашкова Антонина Юрьевна. – Ростов-на-Дону, 2008 – 26 с.
57. Петров, А.А. Опыт математического моделирования экономики / А.А. Петров, И.Г. Поспелов, А.А. Шананин. – М.: Энергоатомиздат. 1996. – 544 с.
58. Пинигин, М.А. Гигиенические основы оценки степени загрязнения атмосферного воздуха / М.А. Пинигин // Гигиена и санитария. – 1993. – № 7. – С. 4-8.
59. Рыбина, Г.В. Теория и технология построения интегрированных экспертных систем / Г.В. Рыбина. – М.: ООО Издательство «Научтехлитиздат», 2008. – 482 с.
60. Самарский, А.А. Математическое моделирование: Идеи, методы, примеры / А.А. Самарский, А.П. Михайлов. – М.: Физматлит, 2001. – 320 с.
61. Сарычев, А.В. Анализ сценариев развития региона в системе эколого-экономического мониторинга / А.В. Сарычев, А.Д. Замковая // Научный вестник НГУ Украины. – 2001. – № 5. – С. 47-78.
62. Сидоренко, В.Н. Информационно - системный анализ эколого-экономических процессов (системно-динамический подход) – автореф. дис. ... канд. экон. наук: 08.00.19, 08.00.13 / Сидоренко Владимир Николаевич. – Москва, 1998. – 28 с.
63. Системные исследования взаимодействия природы и хозяйства региона / под ред. В. И. Гурмана. – Иркутск: Изд-во Иркут. ун-та, 1986 – 184 с.
64. Советов, Б.Я. Моделирование систем / Б.Я. Советов, С.А. Яковлев. – М.: Высш. шк., 2001. – 343 с.
65. Столбов, А.Б. Технология идентификации параметров в медико-эколого-экономической модели / А.Б. Столбов // Труды XV Байкальской международной школы-семинара «Методы оптимизации и их приложения».

Т. 5: Прикладные задачи. – Иркутск: РИО ИДСТУ СО РАН, 2011. – С. 135-140.

66. Ушмаев, Т.М. Оценка экономических потерь и ущерба здоровью и жизни населения от ухудшения окружающей среды / Т.М. Ушмаев // Проблемы окружающей среды и природных ресурсов. – 1994. – №9. – С. 50-66.

67. Форрестер, Дж. Мировая динамика / Дж. Форрестер – М.: Наука, 1978. – 168 с.

68. Хилл, Б.А. Основы медицинской статистики. / Б.А. Хилл. – М., 1958 – 306с.

69. Цыганов, М.А. Применение статистических методов для прогнозирования антропогенного загрязнения атмосферы Республики Мордовия в аспектах обеспечения эколого-экономической безопасности / М.А. Цыганов, Ю.В. Сажин. // Вестник Оренбургского гос-го ун-та. – 2008. – № 84. – С. 75-83.

70. Цыганов М. А. Статистический анализ и прогнозирование антропогенного загрязнения окружающей среды в системе экологической безопасности региона (на примере республики Мордовия) – автореф. дис. ... канд. экон. наук: 08.00.12 / Цыганов Михаил Александрович. – Саранск, 2008. – 21 с.

71. Шенон, Р. Имитационное моделирование систем: искусство и наука / Р. Шенон. – М.: Мир, 1978. – 420 с.

72. АИТ, Asian Institute of Technology [Электронный ресурс]: офиц. сайт. – Загл. с экрана. – URL: <http://www.ait.ac.th> (дата обращения: 15.05.2016).

73. Ballard, C. L. Financing Universal Health Care in the United States: A General Equilibrium Analysis of Efficiency and Distributional effects / C. L. Ballard, J. H. Goddeeris // National Tax Journal. – 1999. – № 52. – С. 31-51.

74. Behrens. The Dynamics of Natural Resource Utilization / Behrens, W. William // In Dennis L. Meadows & Donella H. Meadows (ed.) Towards Global

Equilibrium: Collected Papers. – Cambridge MA: Productivity Press, 1974. – С. 141-164.

75. Capros, P. Double Dividend Analysis: First Results of a General Equilibrium Model (GEM-E3) Linking the EU-12 Countries / P. Capros, G. Georgakopoulos, S. Zografakis, S. Proost, D. van Regemorter, K. Conrad, T. Schmidt, Y. Smeers // In C. Carraro et. al. (eds.): Environmental Fiscal Reform and Unemployment, Kluwer, 1996. – С.193 - 227.

76. Christensen, V. Ecopath II - a software for balancing steady-state ecosystem models and calculating network characteristics / V. Christensen, D. Pauly // Ecological Modelling. – 1992. – № 61. – С. 169-185.

77. CLIPS: a tool for building expert system [Электронный ресурс]: офиц. сайт. – Загл. с экрана. – URL: <http://clipsrules.sourceforge.net> (дата обращения: 15.05.2016).

78. Conrad, K. Environmental Policy Instruments using General Equilibrium Models / K. Conrad, M. Schröder // Journal of Policy Modeling. – 1993. – №15. – С. 521 - 543.

79. C++ Standards [Электронный ресурс]. – Загл. с экрана. – URL: <http://www.open-std.org/jtc1/sc22/wg21/docs/standards#14882> (дата обращения: 15.05.2016).

80. Dixon, Peter B. Rational expectations for large CGE models: A practical algorithm and a policy application / Peter B. Dixon, K.R. Pearson, Mark R. Picton, Maureen T. Rimmer // Economic Modelling. – 2005. – Том 22. – №. 6. – С. 1001-1019.

81. Doorenbos, Robert B. Production Matching for Large Learning Systems [Электронный ресурс] / Robert B. Doorenbos. – 1995. URL: <http://reports-archive.adm.cs.cmu.edu/anon/1995/CMU-CS-95-113.pdf> (дата обращения: 15.05.2016).

82. Eclipse, The Eclipse Foundation open source community website [Электронный ресурс]: офиц. сайт. – Загл. с экрана. – URL: <http://www.eclipse.org> (дата обращения: 15.05.2016).

83. Eviews [Электронный ресурс]: офиц. сайт. – Загл. с экрана. – URL: <http://www.eviews.com> (дата обращения: 15.05.2016).
84. Forrester, Jay. Industrial Dynamics: A Major Breakthrough for Decision Makers / Jay Forrester // Harvard Business Review. – 1958. – Том. 36. №. 4. – С. 37-66.
85. Forrester, Jay. Industrial Dynamics / Jay Forrester. – Cambridge, MA: MIT Press, 1961. – 464 с.
86. Freeman, A. M. Valuing environmental resources under alternative management regimes / A. M. Freeman // Ecological Economics. – 1991. –Том. 3. № 3. – С. 247-256.
87. Goulder, L.H. The Cost-Effectiveness of Alternative Instruments for Environmental Protection in a Second-Best Setting / L.H. Goulder, I.W.H. Parry, R.C. Williams, D. Burtraw // Journal of Public Economics. – 1999. –№ 72. – С. 329-360.
88. Hrubovcak, J. Limitations in Evaluating Environmental and Agricultural Policy Coordination Benefits / J. Hrubovcak, M. Le Blanc, J. Miranowski // American Economic Review. – 1990. – № 80. –С. 208-212.
89. IIASA, International Institute for Applied Systems Analysis [Электронный ресурс]: офиц. сайт. – Загл. с экрана. – URL: <http://www.iiasa.ac.at/> (дата обращения: 15.05.2016).
90. Jacoby, Henry D. Technology and Technical Change in the MIT EPPA Model / Henry D. Jacoby, John M. Reilly, James R. McFarland, Sergey Paltsev // Energy Economics. – 2006. – № 5-6. – С. 610-631.
91. Jorgenson, D. W. Environmental regulation and U.S. economic growth, / D. W. Jorgenson, P. J. Wilcoxon //The Rand Journal of Economics. – 1990 – № 21.– С. 314-340.
92. Jorgenson, D. W. Energy, the Environment and Economic Growth / D. W. Jorgenson, P. J. Wilcoxon // Handbook of Natural Resources and Energy Economics, Amsterdam, North-Holland. – 1993. – Том 3. – С. 1267-1349.

93. Klein, L.R. An econometric model of the United States 1929-1952 / L.R. Klein, A.S. Goldberger. – Amsterdam: North-Holland Pub. Co., 1955. – 165 с.
94. Loulou, R. ETSAP-TIAM: the TIMES integrated assessment model. part II: mathematical formulation / R. Loulou // Computational Management Science. – 2007. – № 5. – С. 41-66.
95. Manne, A.S. MERGE: A Model for Evaluating Regional and Global Effects of GHG Reduction Policies / A.S. Manne, R. Mendelsohn, R. Richels // Energy Policy. – 1995. – № 23. – С. 17-34.
96. Mayeres, I. Modelling the Health Related Benefits of Environmental Policies – a CGE Analysis for the EU Countries with GEM-E3 / I. Mayeres, D. Van. Regemorter // The Energy Journal. – 2008. – Т. 29. – № 1. С. 135-150.
97. Meadows, Donella H. The Limits to growth / Donella H. Meadows. – New York: Universe Books, 1972. – 205 с.
98. Meadows, D.L. Building the Fish Banks Model and Renewable Resource Depletion / D.L. Meadows, M.C. Halbower – MIT, Sloan School of Management, 1996 – 57 с.
99. Millennium Institute [Электронный ресурс]: офиц. сайт. – Загл. с экрана. – URL: <http://www.millennium-institute.org> (дата обращения: 15.05.2016).
100. Millennium Institute resources [Электронный ресурс]: Список социо-эколого-экономических моделей, разработанных в Институте тысячелетия. – Загл. с экрана. – URL: <http://www.millennium-institute.org/resources/elibrary/> (дата обращения: 15.05.2016).
101. MIT, Massachusetts Institute of Technology [Электронный ресурс]: офиц. сайт. – Загл. с экрана. – URL: <http://web.mit.edu/> (дата обращения: 15.05.2016).
102. MVS, Model Vision Studium, Technology [Электронный ресурс]: офиц. сайт. – Загл. с экрана. – URL: <http://exponenta.ru/soft/others/mvs/mvs.asp> (дата обращения: 15.05.2016).

103. Nordhaus, W. D. The DICE Model: Background and Structure of a Dynamic Integrated Climate - Economy Model of the Economics of Global Warming / W. D. Nordhaus. // Cowles Foundation Discussion Paper. – 1992. – № 1009. – С. 1-133.

104. Persson, A. Natural Resource Management and Economywide Policies in Costa Rica: A Computable General Equilibrium (CGE) Modeling Approach / A. Persson, M. Munasinghe // The World Bank Economic Review. – 1995. – № 9. – С. 259-285.

105. Petter, Matthew W. The Theoretical Structure of MONASH-MRF / Matthew W. Petter, Mark Horridge, G. A. Meagher, Fazana Naqvi, B.P. Parmenter.// Preliminary Working Paper OP-85. – Melbourne: Monash University Center of Policy Studies. –1996. – 121 с.

106. Protégé, A free, open-source ontology editor and framework for building intelligent systems [Электронный ресурс]: офиц. сайт. – Загл. с экрана. – URL: <http://protege.stanford.edu> (дата обращения: 15.05.2016).

107. Saeed, Khalid. The design of change for economic development: A behavioral modeling and simulation approach / Khalid Saeed. – Bangkok: Asian Institute of Technology, 1988. – 297 с.

108. Seebregts, A. J. Energy/Environmental Modeling with the MARKAL Family of Models / A. J. Seebregts, G. A Goldstein, K. Smekens // Operations Research Proceedings. – 2001. – С. 75-82.

109. Stolbov, A.B. Models of health index dynamics due to anthropogenic factors / A.B. Stolbov, D.E. Urbanovich // Conference proceedings of ECEM'07 «Challenges for ecological modeling in a changing world: Global Changes, Sustainability and Ecosystem Based Management». – Trieste, 2007. – С. 508-509.

110. SPSS, IBM SPSS predictive analytics software [Электронный ресурс]: офиц. сайт. – Загл. с экрана. – URL: <http://www.ibm.com/analytics/us/en/technology/spss/> (дата обращения: 15.05.2016).

111. System Dynamics Self Study [Электронный ресурс]: курс лекций. – Загл. с экрана. – 1998-1999. – URL: <http://ocw.mit.edu/courses/sloan-school-of-management/15-988-system-dynamics-self-study-fall-1998-spring-1999/download-course-materials/> (дата обращения: 15.05.2016).
112. Thissen, M. A Classification of Empirical CGE Modelling [Электронный ресурс] / M. Thissen. – 1998. – URL: <http://www.eco.rug.nl/medewerk/thissen/files/som99c01.pdf> (дата обращения: 15.05.2013). – 19 с.
113. TWIKI, the Open Source Enterprise Wiki and Web 2.0 Application Platform [Электронный ресурс]: офиц. сайт. – Загл. с экрана. – URL: <http://twiki.org/> (дата обращения: 15.05.2016).
114. UMLS, Unified Medical Language System [Электронный ресурс]: офиц. сайт. – Загл. с экрана. – URL: <http://www.nlm.nih.gov/pubs/factsheets/umls.html> (дата обращения: 15.05.2016).
115. Visual C++ 2008 Express Edition [Электронный ресурс]: офиц. сайт. – Загл. с экрана. – URL: <http://www.microsoft.com/visualstudio/en-us/products/2008-editions/express> (дата обращения: 15.05.2013).
116. Wills, A. End-Use or Extraction Efficiency in Natural Resource Utilization: Which is Better? – System approach to Learning and Education into 21th Century / A. Wills // 15th International System Dynamics Conference. – Istanbul, 1997. – С. 783 - 787.
117. Zeller, A. Three stage least-squares: Simultaneous Estimation of Simultaneous Equations / A. Zeller, H. Thei // Econometrica. – 1962. – Т. 30. – С. 54-78.

ПРИЛОЖЕНИЕ А



РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ МЕДИЦИНСКИХ НАУК
Сибирское отделение
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
«ВОСТОЧНО-СИБИРСКИЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР ЭКОЛОГИИ ЧЕЛОВЕКА»
АНГАРСКИЙ ФИЛИАЛ
**НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ
МЕДИЦИНЫ ТРУДА И ЭКОЛОГИИ ЧЕЛОВЕКА**

665827, Россия, Иркутская область, г. Ангарск-27, а/я 1170.
Телефон (3955) 55-90-70, факс (3955) 55-40-77, электронная почта: imt@irmail.ru
КЛИНИКА
665827, Россия, Иркутская область, г. Ангарск- 27, а/я 1154.
Телефон (3955) 55-43-27, факс (3955) 55-75-55, электронная почта: aniimt_clinic@mail.ru

СПРАВКА О ВНЕДРЕНИИ

Материалы диссертационного исследования Столбова Александра Борисовича использованы при проведении анализа и прогнозирования заболеваемости населения города Ангарска Иркутской области в рамках исследовательского проекта «РАЗРАБОТКА МЕТОДИЧЕСКИХ ПОДХОДОВ К ИДЕНТИФИКАЦИИ ЭКОЛОГИЧЕСКИ ОБУСЛОВЛЕННЫХ НАРУШЕНИЙ ЗДОРОВЬЯ НАСЕЛЕНИЯ»

Личное участие автора заключалось в разработке интеллектуального программного комплекса «МЭЭМ: медико-эколого-экономическое моделирование», параметрической идентификации медико-экологической модели и проведении многовариантных сценарных расчетов. Использование данного комплекса позволило повысить точность прогнозных расчетов заболеваемости различных групп населения при изменении экологических факторов.

17.04.2013г.

Директор института,
член-кор. РАМН, д.м.н., профессор

Зав. лабораторией медицинской
экологии, д.м.н., профессор



В.С. Рукавишников

Н.В. Ефимова

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

В приложении рассматривается пример организации процесса работы с интеллектуальным программным комплексом.

Формирование базы знаний в системе Protege. На первом этапе процесса моделирования инженер по знаниям совместно с экспертом-предметником заполняет описание предметной области в базу знаний, которая содержит информацию об основных факторах и отношениях исследуемой системы. При этом не предполагается, что эксперт-предметник должен иметь представление о способах построения математической модели. Далее инженер по знаниям совместно с экспертом в области математического моделирования заполняет базу продукционных правил, в которой содержится информация о методах построения и анализа моделей.

Для облегчения процесса заполнения базы знаний могут использоваться специально подготовленные вопросы. Например, в монографии [50] представлен список таких вопросов для медико-экологической модели. Приведем в качестве примера некоторые из них: «за какое время происходит уменьшение числа обращений населения, не занятого на производстве, до естественного уровня при начальном 10% превышении при отсутствии антропогенных воздействий?»; «какое количество обращений населения за медицинской помощью регистрируется в городе в результате хронического действия загрязняющих веществ (в год)?»; «на сколько уменьшается обращаемость населения за медицинской помощью при лечебно-профилактической деятельности органов здравоохранения (за год)?».

Согласно архитектуре ИПК (раздел 2.2) непосредственный ввод информации для ЛОПО осуществляется с использованием системы Protege [106]. В начале работы с Protege создается база фреймов-образцов,

соответствующих информационно-логическому описанию предметной области (рисунок Б.1).

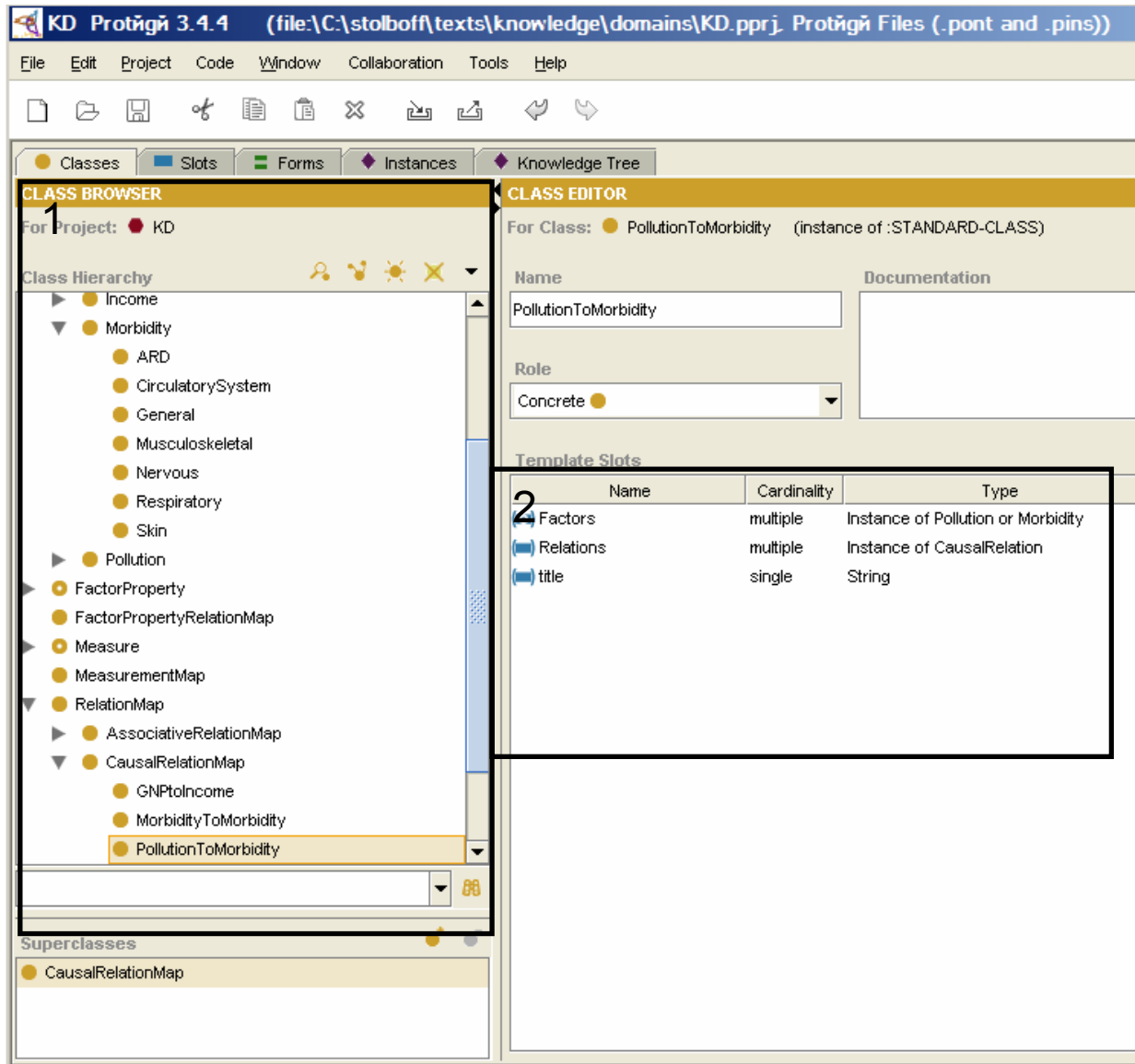


Рисунок Б.1 – Создание фреймов-образцов в Protege

На рисунке Б.1 область 1 представляет собой иерархию фреймов-образцов. В частности представлены такие показатели как «morbidity» («заболеваемость») и «pollution» («загрязнение»). Показатель «заболеваемость» далее рассматривается более подробно как «General» («общая заболеваемость»), «Respiratory» («заболеваемость органов дыхания») и др. В области 2 содержатся слоты специального фрейма, который в дальнейшем будет использован для ввода экспертных оценок о связи между загрязнением и заболеваемостью.

Система «Protege» предоставляет графические элементы (рисунок Б.2) для создания фреймов-экземпляров на основе разработанной иерархии фреймов-образцов.

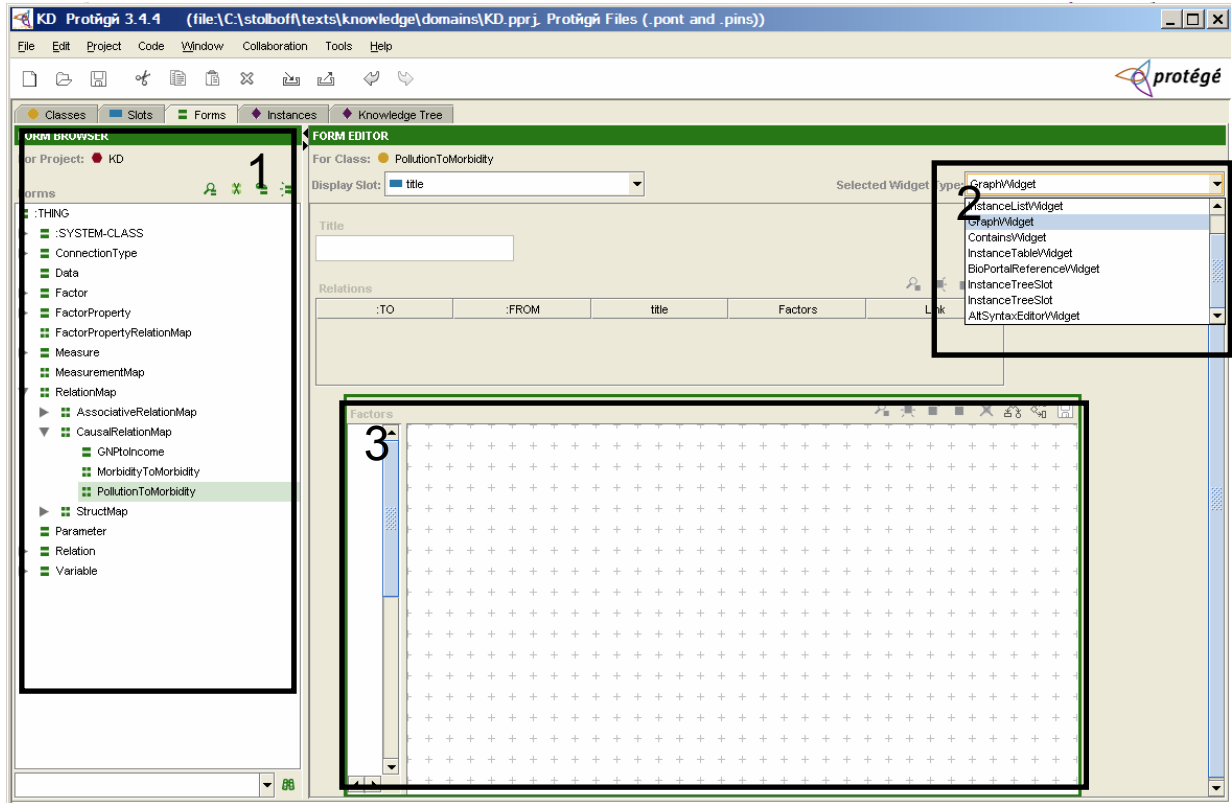


Рисунок Б.2 – Выбор графических элементов для создания фреймов-экземпляров в Protege

На рисунке Б.2 для выбранного в области 1 фрейма «PollutionToMorbidity» из списка возможных графических элементов (область 2) выбирается «GraphWidget» (область 3). В результате такой настройки для задания фреймов будет использован графический элемент, представляющий собой геометрические фигуры, связанные стрелками.

После настройки элементов ввода в диалоговом режиме пользователь с участием инженера по знаниям заполняет базу знаний фреймами-экземплярами. Пример экранной формы представлен на рисунке Б.3.

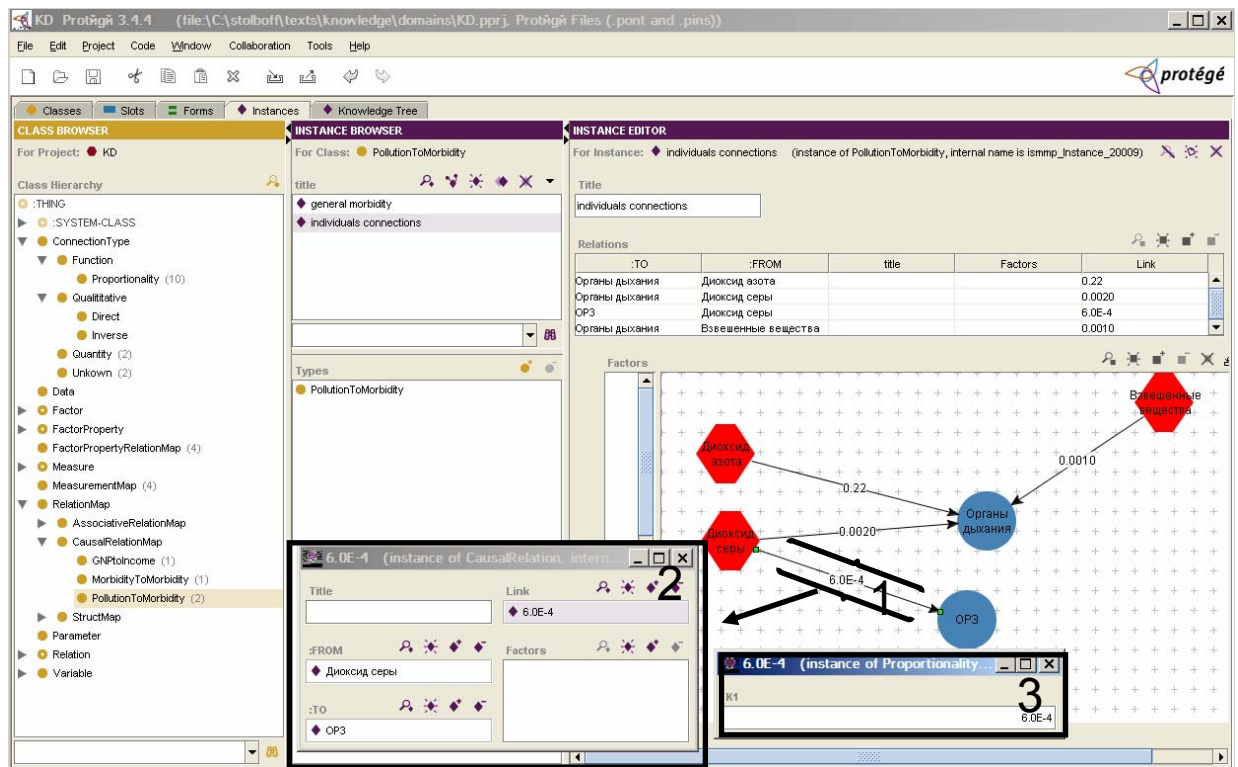


Рисунок Б.3 – Заполнение базы знаний в Protege

На рисунке Б.3 показан пример создания фрейма «причинно-следственная связь», устанавливающая зависимость между показателем воздушной среды «Диоксид серы» и показателем заболеваемости «ОРЗ» (подробная информация о структуре фрейма представлена в таблице 3.1). В области 1 находится направленная стрелка, графически отражающая связи, задаваемая фреймом, представленном в области 2.

Примеры элементов логического описания предметной области, визуально отображаемые в системе Protege, представлены на рисунке Б.4. В области 1 содержится список фреймов-экземпляров экологических показателей.

В результате описанного процесса по заполнению базы знаний формируются файлы ЛОПО в формате Protege: pont – файл с фреймами-образцами; pins – файл с фреймами-экземплярами.

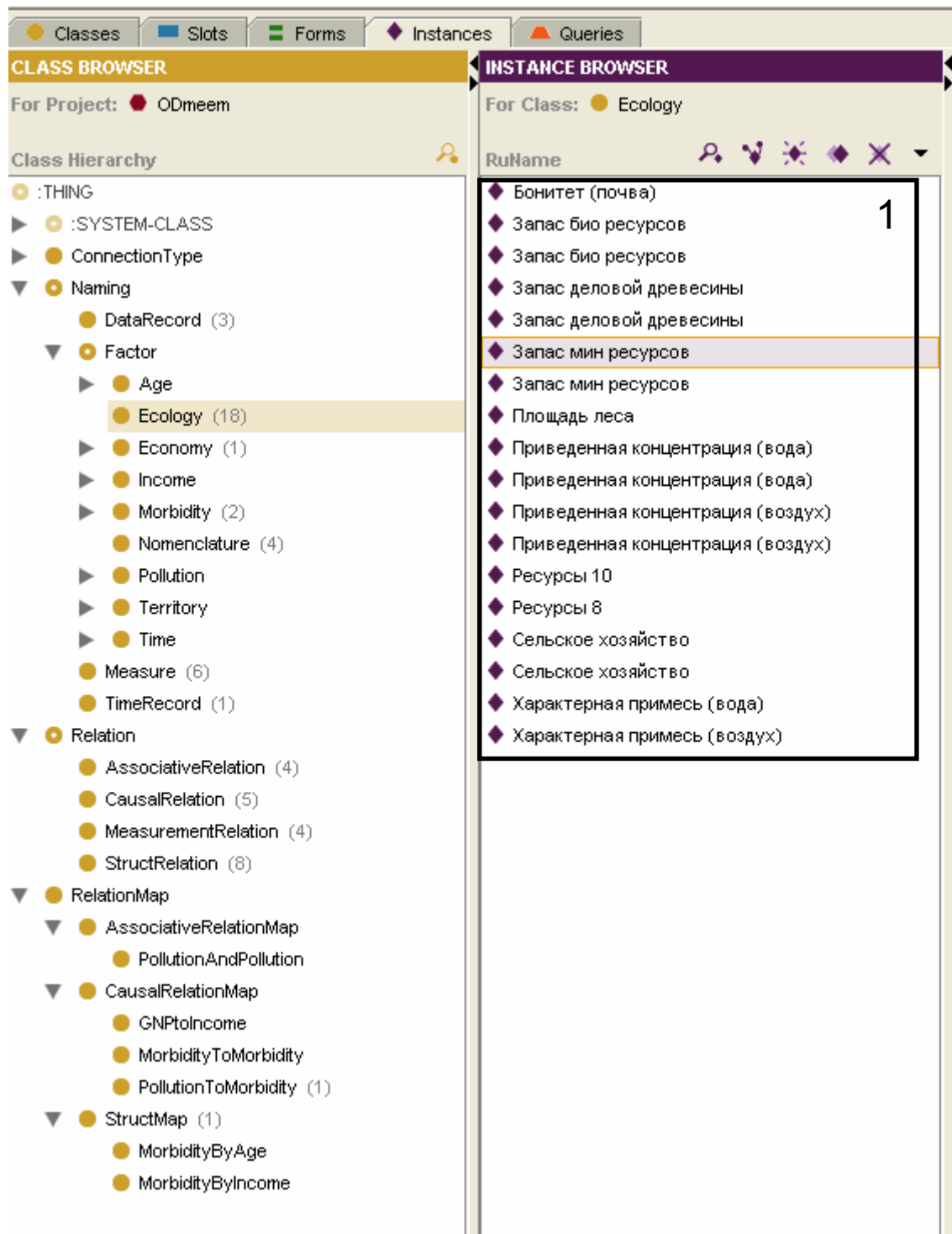


Рисунок Б.4 – Пример фреймов-экземпляров ЛОПО

Конвертация данных в формат ИПК. Для автоматического преобразования данных в формат файла, используемом в ИПК, применяется модуль «Конвертор». Экранная форма модуля «Конвертор», представленная на рисунке Б.5, осуществляет перенос данных матрицы производственных затрат из электронных таблиц Excel. Для этого указываются координаты

области листа Excel, содержащего данные, новое имя объекта («A59E»), номенклатура показателей.

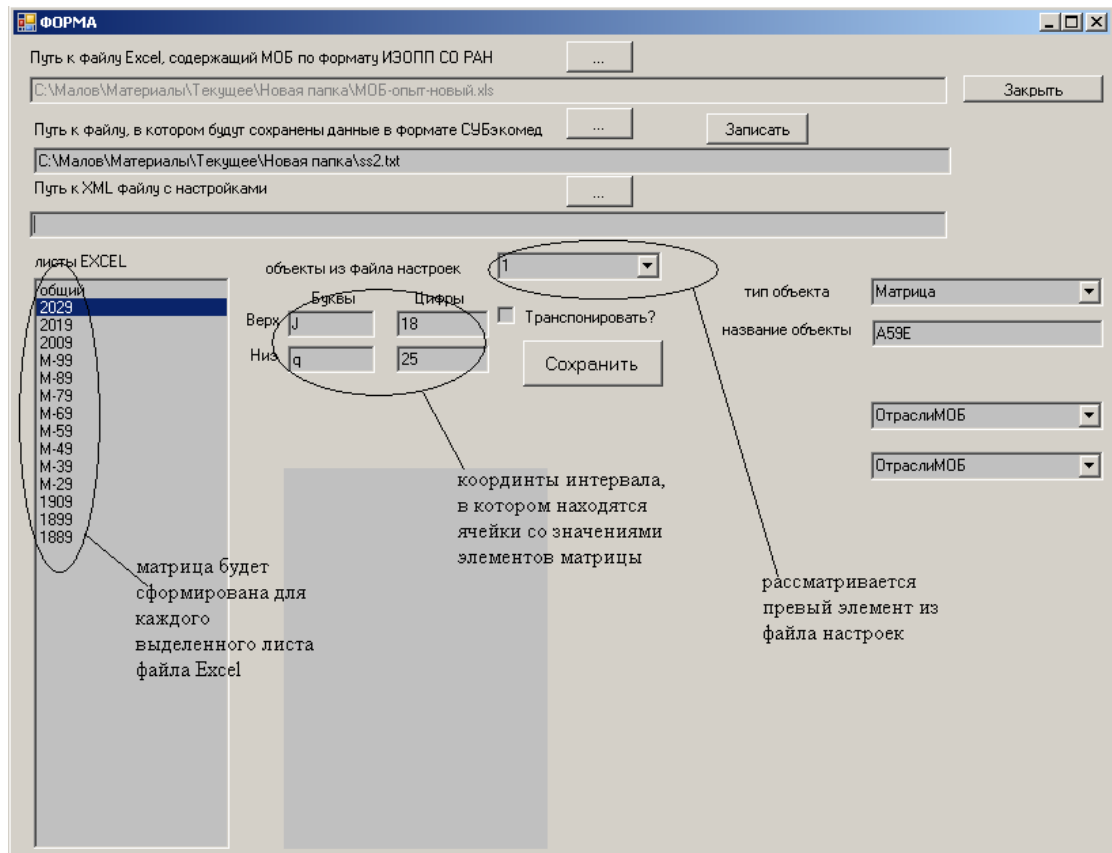


Рисунок Б.5 – Экранная форма модуля «Конвертор»

Модуль «Расчет». Вся информация, связанная с процессом построения модели, за исключением базы знаний ЭС, содержится в файле проекта (расширение vml). Файлы проекта (рисунок Б.6, область 1) могут содержать ссылки на другие файлы с информацией о формируемой модели (em1), которые будут последовательно загружаться в рабочую память программы.

Вид «файлы проекта» позволяет просматривать структуру файлов, составляющий текущий проект. В примере корневым файлом является «model.vml». В области 2 рисунка Б.6 показано содержимое файла X.em1, в котором хранятся значения выпусков продукции по годам для эколого-экономической модели России (раздел 4.3.3).

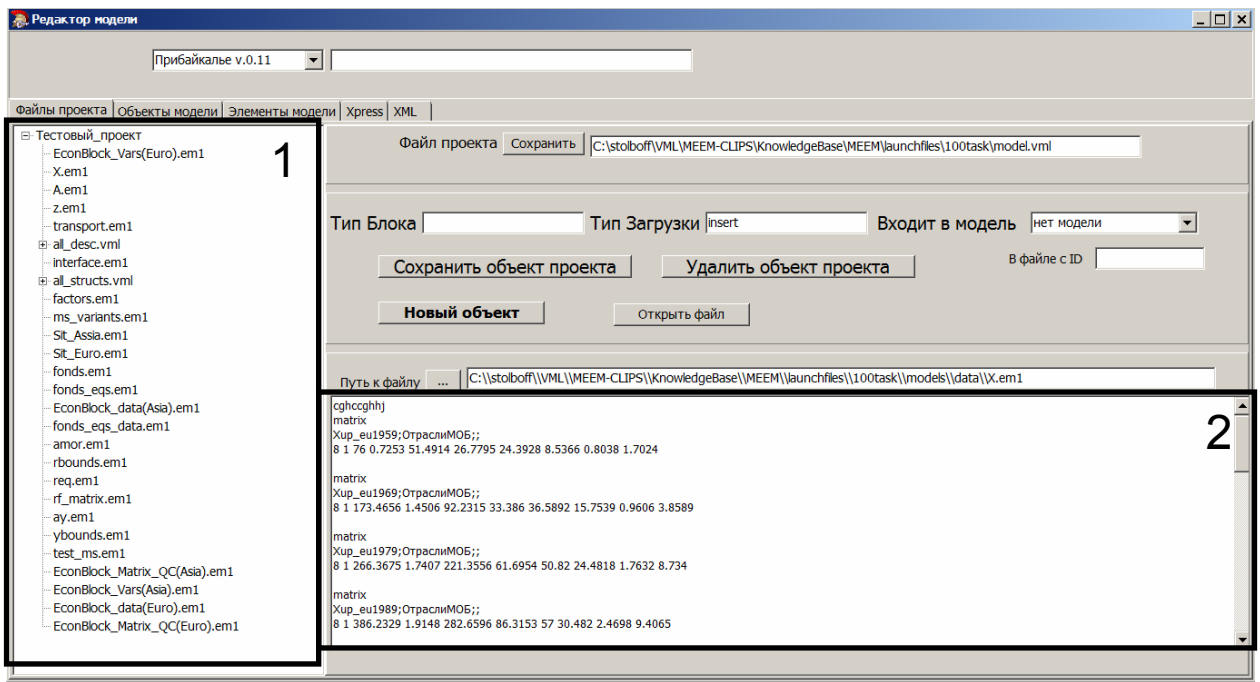


Рисунок Б.6 – Обзор файлов проекта на экранной форме «редактор модели» модуля «Расчет»

На вкладке объекты модели можно просматривать и редактировать информацию по программным объектам модели (матрицы параметров, входные данные, настройки методов идентификации, сценарии), описанные в разделе 2.2. На рисунке Б.7 показано дерево объектов проекта (область 1) и информация о выбранном объекте (область 2). На рисунке Б.9 представлена структура некоторой модели (область 1), состоящая из двух блоков «Qblock» и «Cblock». Такая структура модели соответствует уравнению $\dot{R} = Q(R - R^*) + Cv$. В области 1 в дереве указаны уникальные номера программных объектов модели (в данном случае матриц и векторов).

На рисунке Б.8 во вкладке «данные» можно редактировать выбранный объект. В данном случае матрицу параметров C в эколого-экономической модели России.

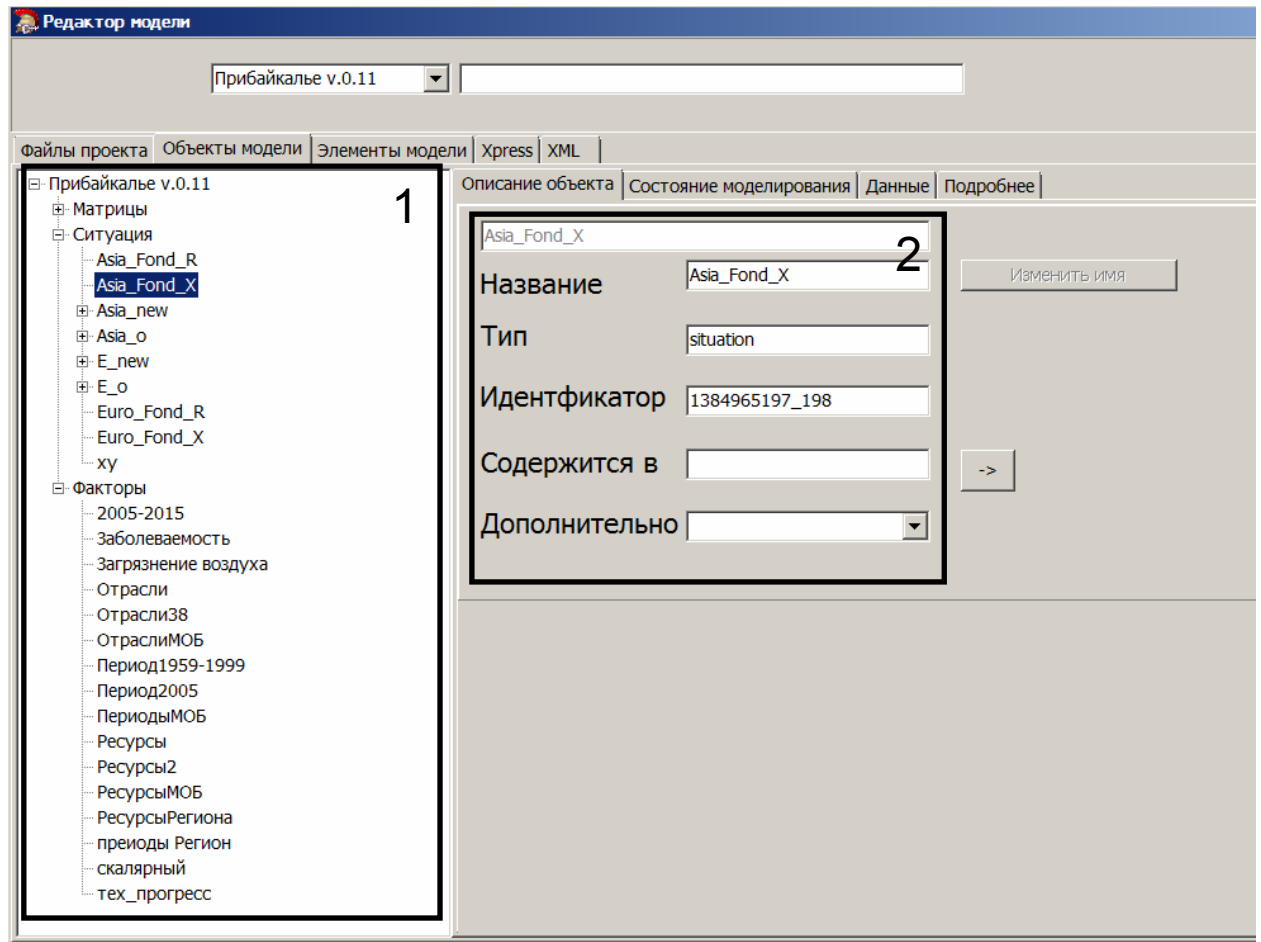


Рисунок Б.7 – Обзор программных объектов модели в модуле «Расчет»

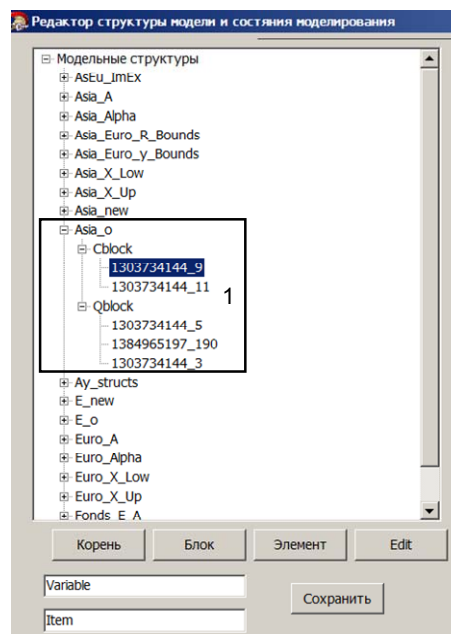


Рисунок Б.8 – Отображение структуры в модуле «Расчет»

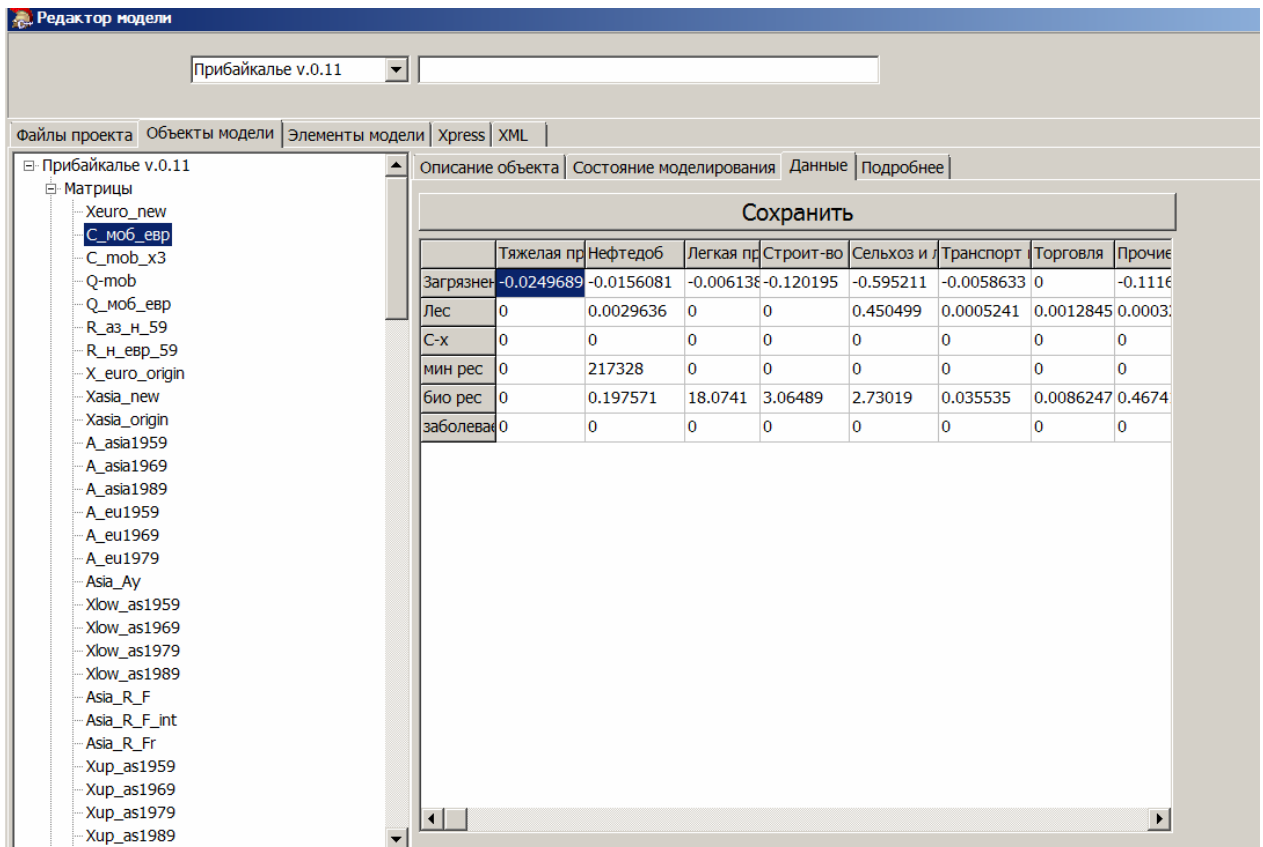


Рисунок Б.9 – Отображение матрицы модели в модуле «Расчет»

Таким образом, помимо реализации вычислительных функций необходимых в процессе логического вывода модулем «Расчет-CLIPS», модуль «Расчет» предоставляет возможности графического интерфейса пользователя для ввода и редактирование разнообразной информации, используемой для формирования моделей.

Подготовка к запуску «Расчет-CLIPS». Перед запуском ЭС, осуществляющей интеллектуальную поддержку процесса построения модели, производится формирование единой базы знаний, включающей фреймы-образцы (файл *ront*) и фреймы-экземпляры (файл *rint*), а также продукционные правила и инструкции для машины вывода CLIPS (файлы *slp* и *bat*). Для этого с использованием формы, представленной на рисунке Б.10, указывается местоположение необходимых файлов.

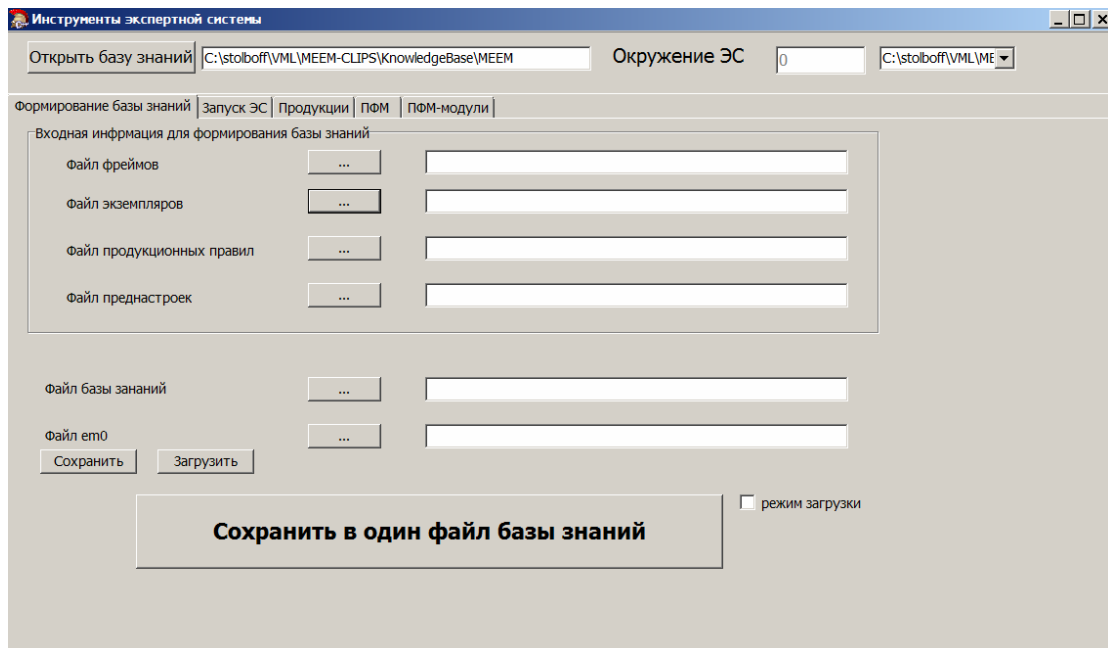


Рисунок Б.10 – Создание единой базы знаний экспертной системы

Для запуска ЭС на выполнение (рисунок Б.11) необходимо: 1) открыть файл единой базы знаний; 2) обнулить рабочую память ЭС; 3) запустить вывод. Одновременно можно загрузить несколько файлов баз знаний и работать с ними независимо, выбирая нужную в выпадающем списке (область 1). Отображение технической информации о процессе вывод осуществляется в области 2.

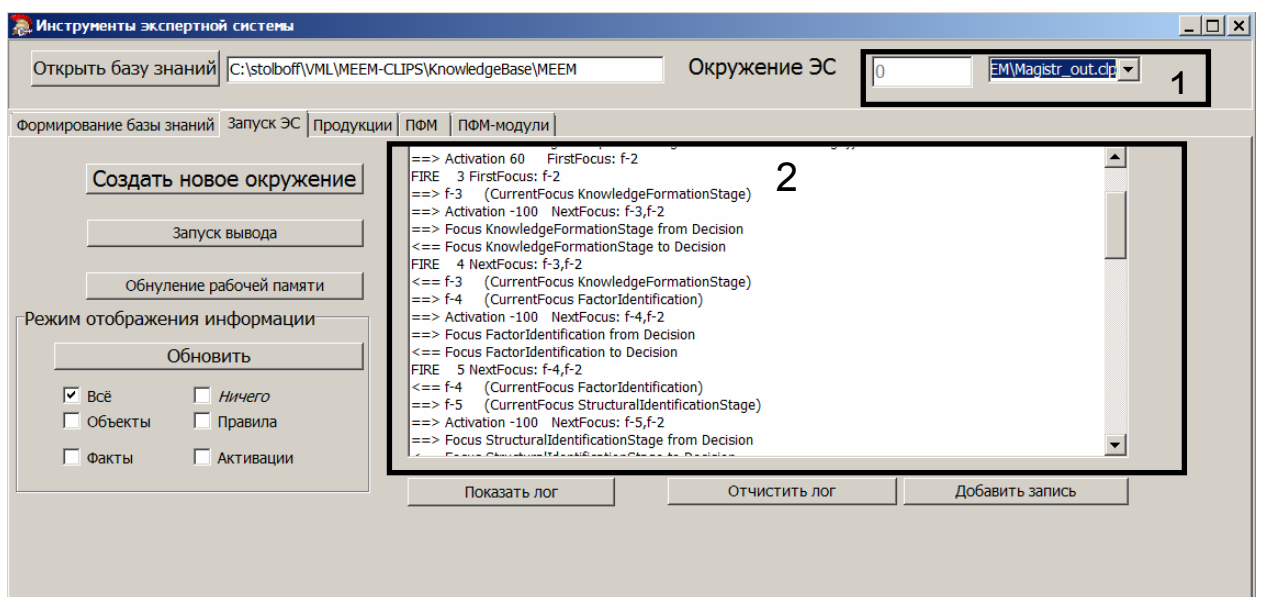


Рисунок Б.11 – Запуск экспертной системы

Далее приведем некоторые **примеры программных процедур и функций** модуля «Расчет», вызываемые из модуля «Расчет-CLIPS» при формировании модели. Далее DS обозначает класс «Источник», описанный в разделе 3.3.1; STRING - строковый тип данных; другие обозначения типов стандартны для языка с++.

Установка значений в некоторый объект приемник: apiSetDSValue(DS приемник, ключевое слово, DS добавляемый объект); apiRemDSValue(DS приемник, ключевое слово/имя объекта); apiSetDoubleValue(DS приемник, ключевое слово/имя объекта, значение); apiSetStrValue(DS приемник, ключевое слово/имя объекта, STRING значение).

Создание, запуск на вычисления (если применимо к объекту), получение значений и типа объекта, установка типа измерений: apiCreateSMFObject(DS объект); apiLaunchSMFObject(DS объект); int apiGetTypeDim(DS объект); DS объект apiGetToType(DS объект); DS объект apiGetFromType(DS объект); apiSetMeasureForType(DS приемник, DS измерение).

Тиражирование и идентификация apiReplMatrixWitCor(DS регион, имя блока); apiRegionEconomyReplication(DS регион, имя блока); bool apiMakePT1(double t0, double dataX, double NL, double RP, double NLpercent, DS матрица) – компонентный эксперимен.

Пользовательский визуальный интерфейс: STRING массив apiChooseStrings(STRING массив); STRING apiChooseString(STRING массив); STRING apiInputDialog(void*);

Операции с матрицами: int CreateNullMatrix (); void* apiSumMatrix(DS матрица); void* apiSubtrMatrix(DS матрица).

Процесс работа «Расчет-CLIPS». База знаний интегрированной экспертной системы разделена на модули. Каждый модуль соответствует некоторой процедуре формирования модели (ПФМ) или этапу построения модели. Выбор следующего этапа зависит от результатов предыдущего.

Связь между этапами вообще и ПФМ каждого этапа в частности осуществляется за счет обмена данными, содержащимися во фрейме «состояние моделирования» (таблица 3.2).

После запуска на выполнение на первом этапе происходит определение *общей номенклатуры показателей моделей*. Далее определяются конкретные *математические соотношения*, задающие модель типа (2.1.3), на основе выбранных для исследования подсистем (экономическая, экологическая, медицинская, социальная, демографическая), набора показателей, характеризующих их состояние, и единиц измерения этих показателей. Например, для описания экономического блока могут быть заданы следующие номенклатуры: агрегированная (8 отраслей), агрегированная (13 отраслей), отраслевая классификация (38 отраслей).

Следовательно, задачей ЭС на этом этапе будет заполнение фреймов, отражающих следующие соответствия между элементами ЛОПО: <регион, факторы>; <регион, факторы, измерения>; <фактор, блок уравнения>; <блок уравнения, переменные>. В ходе этого процесса ЭС может обращаться к пользователю через диалоговый интерфейс. Например, на рисунке Б.12 показан выбор состава эндогенных переменных модели.

Здесь пользователь из списка предложенных на основе анализа экспертной системой ЛОПО вариантов выбрал такие эндогенные показатели как Age (возраст), Income (доход) и Morbidity (заболеваемость). В результате такого выбора ЭС сформирует номенклатуру эндогенных показателей, описывающую заболеваемость по возрастным группам относительно дохода человека. После выбора экзогенных и эндогенных переменных для указанных опорных точек осуществляется формирование структуры модели типа (2.1.3), и создаются соответствующие программные объекты модели.

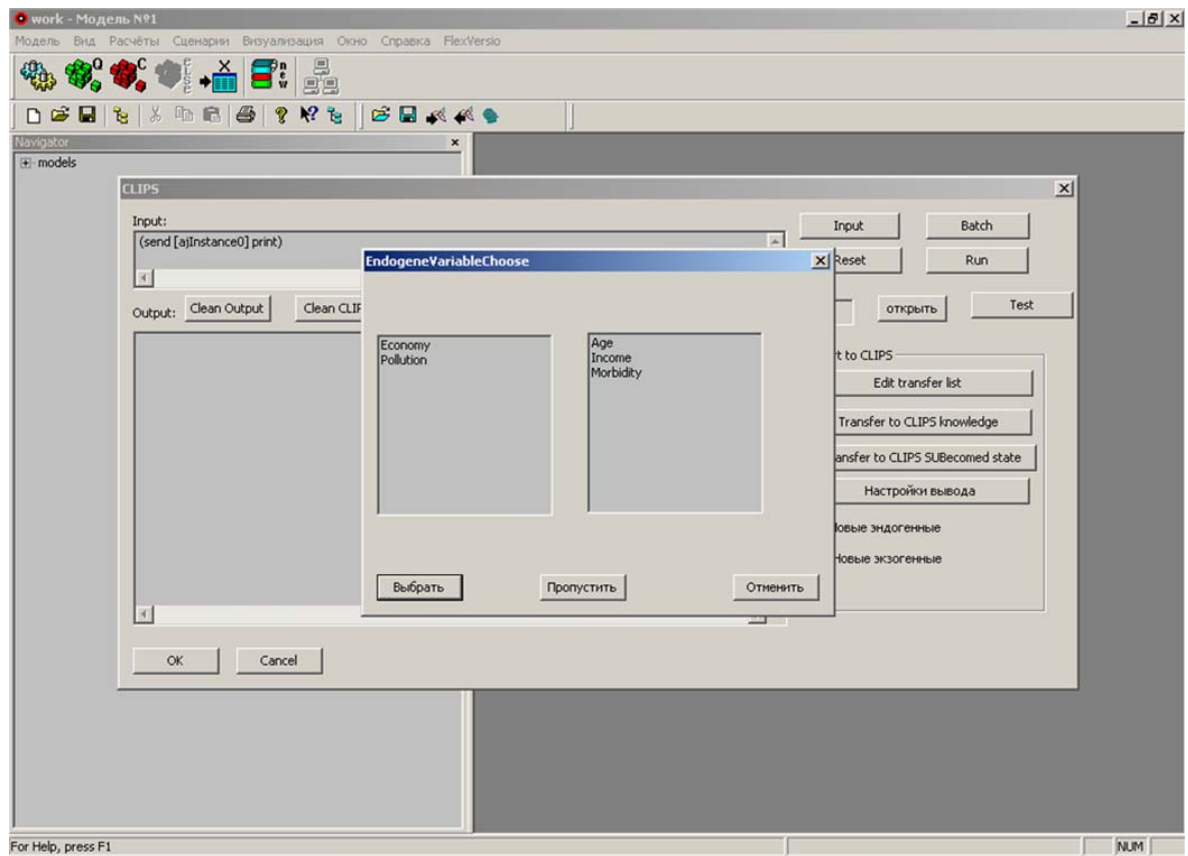


Рисунок Б.12 – Диалоговое окно выбора состава переменных в модели

Выполнение следующего этапа - *определения параметров* - начинается с анализа предыдущих, и на основе текущей структуры модели задаются задания на параметрическую идентификацию. Для этого создаются фреймы-экземпляры типа «состояние моделирование». Например, добавление в базу знаний одного из таких фреймов (далее описание в формате CLIPS):

(ObjectRepresentation (Condition *need_to*) (Action *identify*)

(Type *Region*)(Id "*Красноярский край*")

(With "*Тиражирование*" Ву "*Иркутская область*")

означает, что необходимо (ключевое слово *need_to* в слоте Condition) идентифицировать (ключевое слово *identify* в слоте Action) модель соответствующую региону «Красноярский край» (ключевое слово *Region* в слоте Type) с использованием процедуры тиражирования, где за базовый регион выбрана «Иркутская область» (слот With).

Далее ЭС определяет цели по определению каждого параметра согласно заданной на предыдущем этапе структуре модели:

(ObjectRepresentation (Condition *need_to*) (Action *identify*))

(Type *Matrix*)(Id 1303734144_7)

(With "*Тиражирование*" Ву "*Иркутская область*")),

где значение слота Id является уникальным номером идентифицируемой матрицы *C* для Красноярского края. По этому номеру может быть получен объект класса «Источник», который используется во многих вычислительных функциях как входной параметр (например, функции, приведенные в таблице 3.4).

Продукционные правила ЭС должны на основе поставленных целей осуществить запуск соответствующих программных процедур модуля «Расчет». При этом они определяют необходимые для их запуска данные. Например, для проведения процедуры тиражирования, в зависимости от содержательного смысла параметра модели (влияние производственной деятельности на загрязнение воды или воздуха), согласно алгоритму на стр. 43-44, необходимо задать масштабирующие коэффициенты. Для этого ЭС определяет ведущие характеристики (площадь региона, объем годового стока или площадь леса) в базовом и исследуемом регионе и осуществляет требуемые вычисления коэффициентов.

Назначение некоторых других правил этапа определения параметров:

1. SetGoalForEndogenLink – устанавливается цель: идентифицировать связь.
2. CreateInfluenceMatrixAtTime – создается матрица, куда будет записаны результаты расчетов.
3. LaunchDiagonalEndogenIdent – предварительные установки перед идентификацией диагональных элементов: установка периода времени.
4. MakePTIdentDiagonalAtTime – проведение идентификации для всех диагональных элементов сразу.

5. `LaunchEndogenIdent` – предварительные установки перед идентификацией внедиагональных элементов: установка периода времени (следующий за t_0 из п.3).

6. `DetectCanIdentifyByPTWithPropotionalityEndogen` – определяет элементы, которые необходимо идентифицировать и устанавливает для них известные экспертные знания.

7. `MakePTIdentEndogenAtTimeItem` – запускает идентификацию конкретных элементов на конкретном периоде.

8. `MakePTIdentEndogenAtTimeEnd` – определяет все ли параметры, где это было возможно идентифицированы.

На этапе вычислительных экспериментов для формирования сценариев используются два способа. Первым способом является реализации вычислительного эксперимента с использованием сценариев, основанных на магистральных решениях задач для моделей многокомпонентных динамических систем.

Второй способ предполагает создание нового сценария на основе комбинации стандартных сценариев. Набор стандартных сценариев включает в себя некий базовый сценарий, который отражает сложившиеся тенденции функционирования системы и сценарии, отражающие различные изменения переменных и параметров модели.

Процесс создания некоторого сценария S определяется следующей последовательностью: 1) S выбирается из множества формальных сценариев, под которыми подразумевается любая заданная комбинация входов математической модели ; 2) определяется вид изменений в математической модели, связанных с S ; 3) в информацию об S добавляется содержательная интерпретация из информационно-логического описания предметной области.

Для содержательной интерпретации таких изменений могут быть использованы подходы к решению существующих проблем из конкретных областей знаний [9]. Например, при исследовании экономики региона

сценарии могут разрабатываться с учетом существующих программ развития территории, программ реконструкции и развития предприятий; предложений экспертов и т.п.

В результате работы ЭС пользователь получает идентифицированные модели и некоторые расчеты по определенному набору стандартных сценариев. С полученными моделями в рамках модуля «Расчет» (рисунки Б.7– Б.9) могут быть в дальнейшем проведены дополнительные исследования (корректировка структуры и параметров, новые сценарные расчеты и т.п.).

ПРИЛОЖЕНИЕ В

Методика анализа и оценки сценарных расчетов для модели динамики заболеваемости населения

Несмотря на разработанность ряда методологических подходов к оценке стоимости ущерба здоровью и жизни людей от антропогенных воздействий, единой методики получения такой оценки на сегодняшний день не существует. Наиболее распространённые методики описаны в [66]. Рассмотрим одну из них.

Методика, основанная на прямых и дополнительных затратах общества. Эта методика разработана на базе экономического подхода, в котором учитываются прямые и дополнительные затраты общества от заболевания трудящихся. Данная методика ориентирована на информацию, содержащуюся в профсоюзных комитетах, отделах здравоохранения и статистической отчетности, и может быть использована для расчёта ущерба как на микроуровне (т.е. на уровне предприятия, города и т.п.), так и на макроуровне (в целом для страны, региона).

Полный ущерб общества от заболеваемости населения вследствие загрязнения окружающей среды складывается из следующих составляющих:

$$Y_{\text{полный}} = Y_{\text{н.п.}} + Y_{\text{с.с.}} + Y_{\text{з.д.}}, \quad (1)$$

где: $Y_{\text{н.п.}}$ – ущерб от недовыработки продукции за время болезни трудящихся, занятых в сфере материального производства;

$Y_{\text{с.с.}}$ – выплаты из фондов социального страхования за период временной и постоянной нетрудоспособности рабочим и служащим;

$Y_{\text{з.д.}}$ – затраты в сфере здравоохранения на лечение трудящихся от болезней, вызванных загрязнением окружающей среды.

В свою очередь, ущерб от недовыработки продукции определяется на основе следующего выражения:

$$Y_{\text{н.п.}} = P_{\text{ср.}} * B * D_{\text{ср.}}, \quad (2)$$

где: $P_{\text{ср.}}$ – среднее значение чистой продукции, приходящейся на один человеко-день;

B – количество трудящихся, перенесших заболевания либо отвлеченных от производства по уходу за больными членами семьи по причинам, вызванным загрязнением окружающей среды;

$D_{\text{ср.}}$ – среднее число пропущенных по болезни рабочих дней одним трудящимся в течение года.

Выплаты из фондов социального страхования равны:

$$Y_{\text{с.с.}} = B_{\text{п}} * V_{\text{ср.п}} * D_{\text{ср.п}}, \quad (3)$$

где: $B_{\text{п}}$ – количество людей, получающих пособия вследствие заболеваний, вызванных загрязнением окружающей среды;

$V_{\text{ср.п}}$ – средний размер пособия по временной нетрудоспособности, приходящийся на один день болезни, руб;

$D_{\text{ср.п}}$ – среднее число пропущенных по болезни рабочих дней одним трудящимся в течение года.

Затраты в сфере здравоохранения определяются следующим образом:

$$Y_{\text{з.д.}} = Z_{\text{а}} * B_{\text{а}} * D_{\text{ср.а}} + Z_{\text{с}} * B_{\text{с}} * D_{\text{ср.с}}, \quad (4)$$

где: $Z_{\text{а}}$ и $Z_{\text{с}}$ – стоимость одного дня лечения больного соответственно в амбулаторных условиях и в стационаре, руб;

$B_{\text{а}}$ и $B_{\text{с}}$ – количество заболевших в результате антропогенного воздействия, проходивших лечение амбулаторно и в стационаре;

$D_{\text{ср.а}}$ и $D_{\text{ср.с}}$ – среднее число дней болезни одного больного в амбулаторных условиях и в стационаре.

Расширение методики. Для того, чтобы произвести измерение затрат в сфере здравоохранения по данной методике более подробно, переопределим формулу расчета затрат на лечение в амбулаторных условиях следующим образом:

$$Y_{\text{амб}} = Z_{\text{пол}} * B_{\text{пол}} * D_{\text{пол}} + Z_{\text{вызов}} * B_{\text{вызов}} * D_{\text{вызов}}, \quad (5)$$

$Z_{\text{пол}}$ – стоимость одного посещения поликлиники;

$B_{\text{пол}}$ – количество заболевших в результате антропогенного воздействия;

$D_{\text{пол}}$ – среднее число посещений поликлиники во время одной болезни;

$Z_{\text{вызов}}$ – стоимость одного вызова из поликлиники;

$B_{\text{вызов}}$ – количество заболевших в результате антропогенного воздействия

$D_{\text{вызов}}$ – среднее число вызовов из поликлиники во время одной болезни

ПРИЛОЖЕНИЕ Г

Формирование сценариев на основе магистральных решений для медико-эколого-экономической задачи. Рассмотрим процесс сценарного анализа одного из вариантов медико-эколого-экономической системы на основе, описанной в главе 1, процедуры исследования задач оптимального управления с применением магистральных решений для задачи управления медико-эколого-экономической системой [50]. В диссертационной работе для данной модели получены новые магистральные решения, соответствующие новым критериям качества задачи.

В экономическом блоке модели [50] выделяются предприятия города, выпускающие основную массу продукции и являющиеся главными источниками загрязнения. Баланс M предприятий определяется следующими соотношениями:

$$v = A v + B u + A^{(z)} z + B^{(z)} w + A^{(y)} y + x + p + \rho(r) + \beta(v - A v), \quad (\text{Г.1})$$

$$r = G v - z, \quad (\text{Г.2})$$

где v – выпуск продукции предприятия; A – матрица производственных затрат; u – инвестиции; z – интенсивность очистки; $A^{(z)}$ – матрица прямых затрат на восстановление ресурсов; w – инвестиции в очистные сооружения; $\rho(r)$ – плата за сверхнормативные выбросы; r – интенсивность выбросов; G – выбросы загрязнений на единицу продукции; β – налогообложение прибыли предприятия; x – отчисления в систему медицинского и социального страхования; $y(t)$ – интенсивность восстановления здоровья населения; $A^{(y)}$ – матрица прямых затрат на восстановление медико-экологических показателей; $p(t)$ – прибыль.

Данные соотношения дополняются уравнениями для основных фондов выделенных предприятий (Φ_i), основных фондов очистных сооружений

$(\Phi_i^{(z)})$ этих предприятий, основных фондов здравоохранения $(\Phi^{(x)})$ и ограничениями:

$$\dot{\Phi} = u - \Delta\Phi, \quad (\Gamma.3)$$

$$\dot{\Phi}^{(z)} = w - \Delta^{(z)}\Phi^{(z)}, \quad (\Gamma.4)$$

$$\dot{\Phi}^{(z)} = X + \sum_{i=1}^M x_i - \Delta^{(x)}\Phi^{(x)}, \quad (\Gamma.5)$$

$$0 \leq v \leq V(t, \Phi), \quad (\Gamma.6)$$

$$0 \leq z \leq Z(t, \Phi^{(z)}), \quad (\Gamma.7)$$

$$0 \leq \sum_{j=1}^N \delta_j y_j \leq Y(t, \Phi^x), \quad (\Gamma.8)$$

$$u_i, w_i, p_i \geq 0, \quad (\Gamma.9)$$

$$\sum_{j=1}^M \lambda_j \leq 1, \quad (\Gamma.10)$$

где X – поступления из федерального бюджета; Δ_i , $\Delta_i^{(z)}$, $\Delta^{(x)}$ – коэффициенты амортизации, $V(t, \Phi)$, $Z(t, \Phi^{(z)})$, $Y(t, \Phi^x)$ – мощности, степень отчистки, интенсивность восстановления здоровья населения; δ_j – некоторый коэффициент.

Для описания блока «здоровье населения» вводится вектор показателей состояния здоровья населения $h(t)$ в терминах отклонения от «естественного» уровня $h^*(t)$, формирующегося в зависимости от природно-климатических, социальных условий, генетических, этнических особенностей популяции и т.п. Динамика $h(t)$ определяется следующим уравнением:

$$\dot{h} = Qh + Cv + Fr - y, \quad h \in R^N, \quad (\Gamma.11)$$

где h – вектор показателей; Q – матрица взаимовлияния; C – матрица влияния производственных процессов; F – матрица влияния загрязнений.

В модели также должны быть определены начальные условия: $\Phi^{(x)}$

$$\Phi_i(t_0) = \Phi_{i_0}, \Phi_i^{(z)}(t_0) = \Phi_{i_0}^{(z)}, \Phi^{(x)}(t_0) = \Phi_0^{(x)}, h(t_0) = h_0. \quad (\Gamma.12)$$

Согласно процедуре исследования задач оптимального управления для многокомпонентных динамических систем с применением магистральных решений первым этапом является **задание критериев качества задачи**. Основным критерием для сравнения сценариев является интегральная оценка сценария, представляющая собой комбинацию двух составляющих: экономического (например, конечное потребление, «прибыль» региона и т.п.) и экологического, который можно интерпретировать как штраф за отклонение от нормативного уровня состояния медико-экологических показателей при развитии экономики. В общем виде интегральная оценка сценария может быть описана, например как в [51, стр. 14], следующим образом:

$$J = \int_0^T ((1 - \mu)V + \mu W)e^{-\rho t} dt, \quad (\Gamma.13)$$

V - функция, характеризующая состояние экономики; μW - штраф за нарушение условий устойчивого развития с определенным весом μ , $0 \leq \mu \leq 1$, ρ - коэффициент дисконтирования.

Задавая вид функций V и W , мы будем получать варианты критериев оптимальности, которые будут отражать различные оптимизационные сценарии развития исследуемой медико-эколого-экономической системы.

Для рассматриваемой модели [50] критерий оптимальности имеет следующий вид:

$$I = \int_0^T [l^{(p)} \sum_{i=1}^M p_i - l^{(h)} h^T H h] dt \rightarrow \max, \quad (\Gamma.14)$$

где функционал имеет смысл комбинации суммарной прибыли предприятий города (вектор p) и ущерба, связанного с отклонениями показателей здоровья населения от желаемых значений (вектор h); $l^{(p)}$, $l^{(h)}$ - некоторые коэффициенты.

Новые критерии оптимальности. Пусть для модели из [50] вектор h кроме показателей заболеваемости населения включает и показатели состояния природной среды.

В условиях такого предположения проанализируем поведение медико-экологических показателей в процессе развития экономики, т.е. количественного увеличения валового продукта по всем отраслям экономики. Характер изменения показателей ресурсов в модели известен: загрязнение и, соответственно, заболеваемость увеличиваются, а запасы ресурсов уменьшаются. Эту априорную информацию можно учитывать при конструировании критерия в задачах оптимизации. В случае нелинейного вхождения штрафной составляющей в критерий, важно разделить ресурсные показатели на два класса: увеличивающиеся и уменьшающиеся во времени при развитии экономики. Тогда можно выявить следующий эффект. Для «уменьшающихся» показателей в случае, например, квадратичного критерия с развитием экономики штраф, соответствующий негативному эффекту будет уменьшаться, а не увеличивается, как необходимо с точки зрения содержательного смысла критерия. Для решения этой проблемы для каждого класса можно предложить свою функцию штрафа.

Пусть для модели из [50] вектор h содержит N медико-экологических показателей. Введем следующий критерий оптимальности:

$$I = \int_0^T [l^{(p)} \sum_{i=1}^M p_i - l^{(h^I)} (h^I)^T H^I h^I - l^{(h^{II})} (h^{II})^T H^{II} h^{II}] dt \rightarrow \max, \quad (\Gamma.15)$$

$$\text{где } h^I = \begin{cases} h_i, & i \in \text{Index}^I \\ 0, & i \notin \text{Index}^I \end{cases}, \quad h^{II} = \begin{cases} 1/h_i, & i \in \text{Index}^{II} \\ 0, & i \notin \text{Index}^{II} \end{cases}, \quad h_i > 0, \quad i \in \{1, \dots, N\},$$

Index^I - множество индексов медико-экологических показателей, значения которых увеличиваются при росте экономики; Index^{II} - множество индексов медико-экологических показателей, значения которых уменьшаются при росте экономики; $l^{(h^I)}$; $l^{(h^{II})}$, $l^{(p)}$ - некоторые коэффициенты.

Вторым этапом процедуры исследования является **задание необходимых ограничений задачи**. Поэтому введем дополнительно следующие предположения. Для определенности $t_0 = 0$.

В общем случае могут быть заданы конечные условия:

$$\Phi_i^{(z)}(T) = \Phi_{i_T}^{(z)}, \Phi^{(x)}(T) = \Phi_T^{(x)}, \Phi_i(T) = \Phi_{i_T}, h(T) = h_T. \quad (\Gamma.16)$$

Здесь Φ_{i_T} будет определять задаваемый исследователем долгосрочный уровень фондов для i -ой отрасли. Функция $X(t)$ задана.

Производственные функции представимы в виде

$$V_i = \gamma_i \Phi_i^{\alpha_i}, Z_i = \gamma_i^{(z)} (\Phi_i^{(z)})^{\alpha_i^{(z)}}, Y = \gamma^{(x)} (\Phi^{(x)})^{\alpha^{(x)}}, \quad (\Gamma.17)$$

где $\gamma_i, \gamma_i^{(z)}, \gamma^{(x)} > 0, 0 < \alpha_i, \alpha_i^{(z)}, \alpha^{(x)} < 1$.

Функция $\rho(r_i)$ - линейная функция, $\rho(r_i) = \rho r_i$.

Существуют ограничения на основные фонды здравоохранения:

$$\Phi_{\min}^{(x)} \leq \Phi^{(x)} \leq \Phi_{\max}^{(x)}. \quad (\Gamma.18)$$

Третий этап предполагает **определение магистралей при идеализированных предположениях**. Пусть задача, задаваемая соотношениями (Г.1) – (Г.12), (Г.14), (Г.16) – (Г.18), имеет номер 1. Для ее решения используется метод кратных максимумов Кротова-Гурмана [36], который, выступая способом задания функции ϕ в достаточных условиях оптимальности, обеспечивает неединственность по управлению u и при любых x, t максимума функции

$$K = \phi'_x(g(t, x) + h(t, x)u) + \phi_t - g^0(t, x) - h^0(t, x)u \quad (\Gamma.19)$$

для задача оптимального управления:

$$I = \int_{t_0}^T g^0(t, x) + h^0(t, x)u dt \rightarrow \min, \quad (\Gamma.20)$$

$$\dot{x} = g(t, x) + h(t, x)u, u \in U. \quad (\Gamma.21)$$

Поскольку функция $K = \phi'_x(g(t, x) + h(t, x)u) + \phi_t - f^0(t, x, u)$ линейна относительно u , то для того, чтобы достигался максимум функции K по u необходимо выполнение условия $\phi'_x(h(t, x) - h^0(t, x)) = 0$. Функция K , с

найденными с помощью метода кратных максимумов ϕ' , исследуется на максимум по переменным x . Это позволяет найти оптимальное решение в виде разрывной в точках t_0 и T функции.

Функция K , определяемая (Г.19), для задачи 1 будет иметь вид:

$$K_1 = K_1^p + K_1^R + K_1^\Phi + K_1^{\Phi^{(z)}} + K_1^{\Phi^{(x)}} + K_1^h + K_1^t, \quad (\text{Г.21})$$

$$K_1^{\Phi^{(x)}} = \varphi_{\Phi_1^{(x)}} \left(X + \sum_{i=1}^M x_i - \Delta^{(x)} \Phi^{(x)} \right), \quad (\text{Г.22})$$

$$K_1^h = \varphi_h^T [Qh + \sum_{i=1}^M (C_i v_i - F_i r_i) - y], \quad K_1^t = \varphi_t, \quad (\text{Г.23})$$

$$K_1^p = l^{(p)} \sum_{i=1}^M (1 - A_i)(1 - \beta_i) v_i - B_i u_i - A_i^{(z)} z_i - B_i^{(z)} w_i - \lambda_i [A^{(y)}]^T y - x_i - \rho(r_i), \quad (\text{Г.24})$$

$$K_1^R = -l^{(h)} h^T H h, \quad (\text{Г.25})$$

$$K_1^\Phi = \sum_{i=1}^M \varphi_{\Phi_i} (u_i - \Delta_i \Phi_i), \quad (\text{Г.26})$$

$$K_1^{\Phi^{(z)}} = \sum_{i=1}^M \varphi_{\Phi_i^{(z)}} (w_i - \Delta_i^{(z)} \Phi_i^{(z)}). \quad (\text{Г.27})$$

Построим нижние и верхние границы для основных фондов предприятий, очистных сооружений и здравоохранения. Для этого необходимо решить соответствующие уравнения, задающие динамику фондов, без учета инвестиций из заданных выше начальных и конечных точек при условии не отрицательности фондов. Например, для вычисления границ по фондам предприятий (Φ_{ia} и Φ_{ib}) решается уравнение $\dot{\Phi}_i = -\Delta_i \Phi_i$ из точек $(0, \Phi_{i0})$ и (T, Φ_{iT}) при ограничении $\Phi_i \geq 0$. Аналогично получаются границы $(\Phi_{ia}^{(z)}, \Phi_{ib}^{(z)})$ и $(\Phi_{ia}^{(x)}, \Phi_{ib}^{(x)})$.

Согласно методу кратных максимумов (, будем считать, что) функция K не зависит от u_i , w_i , x_i , т.е. от управлений (кроме того есть еще и y):

$$\varphi_{\Phi_i} = l^{(p)} B_i, \quad \varphi_{\Phi_i^{(z)}} = l^{(p)} B_i^{(z)}, \quad \varphi_h = l^{(p)} A^{(y)}, \quad \varphi_{\Phi_i^{(x)}} = l^{(p)}. \quad (\text{Г.28})$$

Дополнительно будем считать $\varphi_t = 0$.

Подставим найденные производные функции φ в выражение функции K и исследуем ее на максимум по v_i , Φ_i , z_i , $\Phi_i^{(z)}$, h , $\Phi_i^{(x)}$ с учетом заданных ограничений.

Обозначим

$$\aleph_i = (1 - A_i)(1 - \beta_i) - [A^{(y)}]'(C_i + F_i G_i) - \rho G_i, \quad (\Gamma.29)$$

$$\aleph_i^{(z)} = \rho + [A^{(y)}]'F_i - A_i^{(z)} \quad (\Gamma.30)$$

и тогда, так как v_i и z_i входят в K_I линейно, получим

$$\tilde{v}_i = \begin{cases} V_i(t, \Phi_i), \aleph_i > 0 \\ 0, \aleph_i \leq 0 \end{cases}, \quad \tilde{z}_i = \begin{cases} Z_i(t, \Phi_i^{(z)}), \aleph_i^{(z)} > 0 \\ 0, \aleph_i^{(z)} \leq 0 \end{cases}. \quad (\Gamma.31)$$

В случае $\aleph_i > 0$ и $\aleph_i^{(z)} > 0$ имеем

$$\begin{aligned} K_I = l^{(p)} \sum_{i=1}^M (-B_i \Delta_i \Phi_i - B_i^{(z)} \Delta_i^{(z)} \Phi_i^{(z)}) - l^{(p)} (X - \Delta^{(x)} \Phi^{(x)}) - l^{(p)} [A^{(y)}]' Q h - \\ - l^{(h)} h' H h + l^{(p)} \sum_{i=1}^M \aleph_i \tilde{v}_i + l^{(p)} \sum_{i=1}^M \aleph_i^{(z)} \tilde{z}_i \end{aligned} \quad (\Gamma.32)$$

Отсюда $\tilde{\Phi}_i = \arg \max_{\Phi_i} K$, $\tilde{\Phi}_i^{(z)} = \arg \max_{\Phi_i^{(z)}} K$, $\tilde{h} = \arg \max_h K$

$$K_{1\Phi_i} = l^{(p)} (B_i \Delta_i - \alpha \gamma \aleph_i \Phi_i^{\alpha-1}), \quad (\Gamma.33)$$

$$K_{1\Phi_i^{(z)}} = l^{(p)} [B_i^{(z)} \Delta_i^{(z)} - \alpha \gamma \aleph_i^{(z)} (\Phi_i^{(z)})^{\alpha-1}], \quad (\Gamma.34)$$

$$K_{1h} = -2l^{(h)} H h - l^{(p)} [A^{(y)}]' Q, \quad (\Gamma.35)$$

$$K_{1\Phi_i^{(x)}} = l^{(p)} (X - \Delta^{(x)} \Phi^{(x)}), \quad (\Gamma.36)$$

$$\tilde{\Phi}_i = \begin{cases} \min[\Phi_{ib}, \left(\frac{\gamma \alpha \aleph_i}{B_i \Delta_i}\right)^{\frac{1}{1-\alpha}}], \aleph_i > 0 \\ \Phi_{ia}, \aleph_i \leq 0 \end{cases}, \quad (\Gamma.37)$$

$$\tilde{\Phi}_i^{(z)} = \begin{cases} \min[\Phi_{ib}^{(z)}, \left(\frac{\gamma \alpha \aleph_i^{(z)}}{B_i^{(z)} \Delta_i^{(z)}}\right)^{\frac{1}{1-\alpha}}], \aleph_i^{(z)} > 0 \\ \Phi_{ia}^{(z)}, \aleph_i^{(z)} \leq 0 \end{cases}, \quad (\Gamma.38)$$

Значения медико-экологических показателей h на магистрали

$$\tilde{h} = -\frac{l^{(p)}}{2l^{(h)}} [A^{(y)}]^T Q H^{-1}. \quad (\Gamma.39)$$

Для задач с новым критерием оптимальности (15) соответствующая функция K_2 будет отличаться от K_1 только слагаемым K^R :

$$K_2^R = -l^{(h^I)} (h^I)^T H^I h^I - l^{(h^{II})} (h^{II})^T H^{II} h^{II}. \quad (\Gamma.40)$$

Исследуем аналогичным образом K_2 и найдем значения медико-экологических показателей на магистрали. Для $i \in Index^I$ $K_2^R = K_1^R$ и

$$\tilde{h}_i = -\frac{l^{(p)}}{2l^{(h^I)}} ([A^{(y)}]^T QH^{-1})_i, \quad i \in Index^I. \quad (\Gamma.41)$$

В случае $i \in Index^{II}$ и диагональной матрицы H

$$K_2^R = -l^{(h^{II})} (h^{II})^T H^{II} h^{II} = -l^{(h^{II})} \sum_{i=1}^N H_{ii} \frac{1}{h_i^2}. \quad (\Gamma.42)$$

Пусть $\hat{h}_i = \frac{1}{h_i^3}$, тогда $K_{2h} = 2l^h H \hat{h} - l^p [A^{(y)}]^T Q$ и

$$\tilde{h}_i = \left(\frac{2l^{(h^{II})} H_{ii}}{l^{(p)} ([A^{(y)}]^T Q)_i} \right)^{\frac{1}{3}}, \quad ([A^{(y)}]^T Q)_i \neq 0. \quad (\Gamma.43)$$

На следующем этапе процедуры исследования производится **аппроксимация магистрального решения с учетом ограничений задачи**. Для этого на отрезке $[0, t^*)$ и $(t^{**}, T]$, где t^* - точка выхода на магистраль, а t^{**} - точка схода с нее, необходимо провести аппроксимацию, например, последовательностью линейных функций.

Рассмотрим вычислительный метод аппроксимации магистрального решения для скалярного варианта модели, при котором экономика региона, загрязнение и здоровье населения представлены обобщенными показателями. Для $t \in [0, t^*]$ получим:

$$\Phi_s(t) = \Phi_0 + st, \quad \Phi_s^{(x)}(t) = \Phi_0^{(x)} + k(s)t, \quad (\Gamma.44)$$

$$h_s(t) = h_0 + n(s)t, \quad \Phi_s^{(z)}(t) = \Phi_0^{(z)} + m(s)t, \quad (\Gamma.45)$$

$$s = \frac{\tilde{\Phi} - \Phi_0}{t^*}, \quad k(s) = \frac{\tilde{\Phi}^{(x)} - \Phi_0^{(x)}}{t^*}, \quad (\Gamma.46)$$

$$n(s) = \frac{\tilde{h} - h_0}{t^*}, \quad m(s) = \frac{\tilde{\Phi}^{(z)} - \Phi_0^{(z)}}{t^*}. \quad (\Gamma.47)$$

$$u_s(t) = \tilde{\Phi}_s + \Delta \tilde{\Phi}_s = s + \Delta(\tilde{\Phi}_0 + st) = \Delta \tilde{\Phi}_0 + s(1 + \Delta t), \quad (\Gamma.48)$$

$$w_s(t) = \tilde{\Phi}_s^{(z)} + \Delta^{(z)} \tilde{\Phi}_s^{(z)} = \Delta^{(z)} \tilde{\Phi}_0^{(z)} + m(s)(1 + \Delta^{(z)} t), \quad (\Gamma.49)$$

$$x_s(t) = \tilde{\Phi}_s^{(x)} + \Delta^{(x)} \tilde{\Phi}_s^{(x)} - X = \Delta^{(x)} \tilde{\Phi}_0^{(x)} - X + k(s)(1 + \Delta^{(x)} t), \quad (\Gamma.50)$$

$$y_s(t) = Q(h_s - h^*) + C v_s + F(G v_s - z_s) - n(s), \quad (\Gamma.51)$$

$$p_s(t) = (1 - A)(1 - \beta) v_s - u_s - A^{(z)} z_s - w_s - \rho(G v_s - z_s) - x_s - A^{(y)} y_s, \quad (\Gamma.52)$$

$$z_s(t) = V(\tilde{\Phi}_s^{(z)}) = \gamma_1 [\tilde{\Phi}_s^{(z)}]^{\alpha_1}, \quad (\Gamma.53)$$

$$v_s(t) = V(\tilde{\Phi}_s) = \gamma \tilde{\Phi}_s^\alpha. \quad (\Gamma.54)$$

Переходный режим на отрезке $[t^{**}, T]$ может быть построен аналогичный образом. Чем меньше переходные отрезки, т.е. чем ближе аппроксимирующая последовательность к теоретическому разрывному решению, тем большим по абсолютный величине должны быть управления u , w , x , обеспечивающие выход на магистраль и сход с нее в конечную точку.

Вычислительные эксперименты. Для поставленной задачи в ИПК был реализован набор ПФМ. На условных данных рассмотрены примеры и получены приближенно-оптимальные магистральные решения. Аппроксимация на интервале $[0, 1]$ для заданных условий $\Phi(0)=75$; $\Phi(1)=85$; $\Phi^z(0)=6$; $\Phi^z(1)=10$; $\Phi^x(0)=4$; $\Phi^x(1)=4$; $h(0)=5$, представлена на рисунке Г.1.

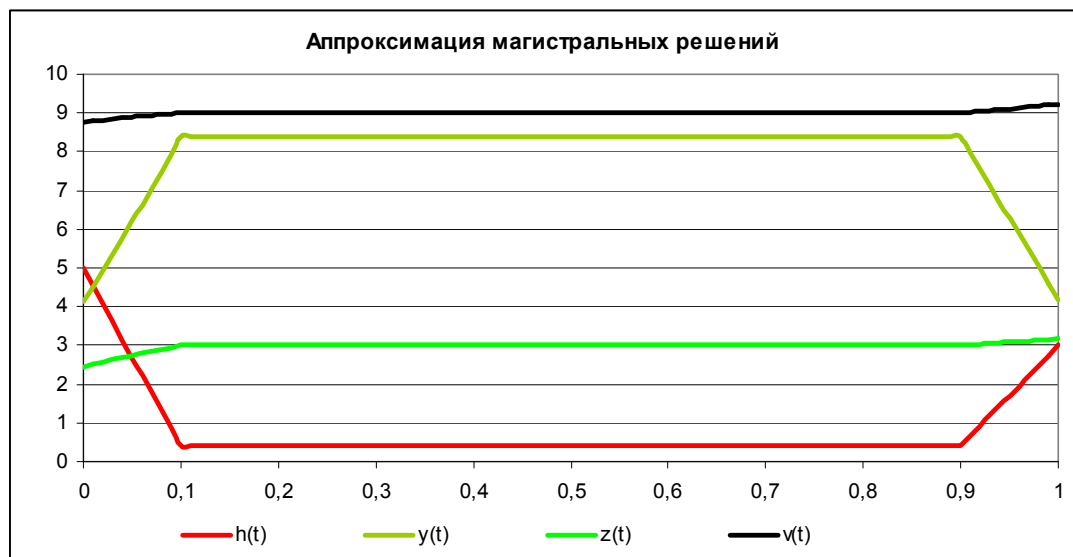


Рисунок Г.1 – Приближенно-оптимальное магистральное решение