

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)

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Иркутск – 2016

Работа выполнена в лаборатории «Системного анализа и вычислительных методов» Института динамики систем и теории управления имени В.М. Матросова Сибирского отделения Российской академии наук

Научный руководитель: доктор физико-математических наук, профессор
Батурин Владимир Александрович

Официальные оппоненты: **Данеев Алексей Васильевич**,
доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры «Информационные системы и защита информации» ФГБОУ ВО «Иркутский государственный университет путей сообщения» (г. Иркутск)

Ничепорчук Валерий Васильевич,
кандидат технических наук,
старший научный сотрудник, ФГБУН Институт
вычислительного моделирования Сибирского отделения
Российской академии наук (г. Красноярск)

Ведущая организация: ФГБУН Институт систем энергетики
им. Л.А. Мелентьева Сибирского отделения Российской
академии наук (г. Иркутск)

Защита состоится 29 ноября 2016 г. в 15.00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.070.07 на базе ФГБОУ ВО «Байкальский государственный университет» по адресу: 664003, г. Иркутск, ул. Карла Маркса, 24, корпус 9, зал заседаний Ученого совета.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке и на сайте ФГБОУ ВО «Байкальский государственный университет» по адресу 664003, г. Иркутск, ул. Ленина, 11, БГУ, корпус 2, аудитория 101, (<http://dissovet.bgu.ru/dissertation/disInfo.aspx?id=33>).

Отзывы на автореферат присылать по адресу: 664003, г. Иркутск, ул. Ленина, 11, БГУ, ученому секретарю диссертационного совета Д 212.070.07.

Автореферат разослан « ____ » _____ 2016 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,
кандидат технических наук, доцент



Т.И. Ведерникова

I. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

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, а также 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-экономическими¹.

К настоящему времени накоплен богатый опыт в изучении динамических систем, разработаны разнообразные методологические подходы. Проблемам формализации, моделированию и прогнозированию регионального развития посвящены работы Л.И. Абалкина, В.А. Батурина, Н.П. Бусленко, С.Н. Васильева, В.М. Глушко, А.Ю. Горнова, А.Б. Горстко, Р.С. Гринберга, В.И. Гурмана, А.В. Данеева, В.А. Дыхты, С.В. Емельянова, В.В. Ивантера, Э. Квейда, В.В. Леонтьева, Г.Г. Малинецкого, В.Ю. Малова, 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, Дж. Форрестера, 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,

¹ Моделирование и оценка состояния медико-эколого-экономических систем / под ред. Батурина В. А. – Новосибирск: Наука, 2005. – 249 с.

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 средств моделирования медико-эколого-экономических систем. Применение этих методов позволит автоматизировать основные этапы построения медико-эколого-экономических моделей (МЭЭМ): 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.

Объектом исследования является региональная социо-эколого-экономическая система.

Предметом исследования являются методы анализ, моделирования и прогнозирования взаимодействия экономики региона и природной среды с учетом фактора здоровья населения в условиях дефицита статистической информации.

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

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

Достоверность и обоснованность работы обеспечивается использованием апробированных методов исследования, представлением и обсуждением результатов на семинарах и конференциях, а также верификацией разработанных моделей и алгоритмов с помощью интерпретации и обсуждения результатов сценарного анализа со специалистами-предметниками.

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 гг.).

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», п. 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.

Научные публикации. Основные результаты диссертации опубликованы в 12 научных работах, в том числе 8 работ в рецензируемых научных журналах, определенных ВАК Министерства образования и науки РФ. Имеется справка о внедрении результатов диссертационной работы в Восточно-Сибирском научном центре Экологии человека РАН.

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

II. СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении содержится общая характеристика исследуемой проблемы, сформулирована цель работы, дано обоснование ее актуальности, приведено краткое изложение выполненных исследований и их результатов.

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 региона². 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 динамических систем в условиях дефицита информации. Предлагается общий алгоритм формирования модели, и рассматриваются варианты его реализации.

Общее свойство рассматриваемых в диссертации медико-эколого-экономических систем заключается в том, что их изучение не укладывается в пределы компетенции ни одного конкретного специалиста и, следовательно, требует междисциплинарного подхода и совместной работы математиков, экспертов, программистов и инженеров по знаниям.

В ходе такой работы математик определяет для исследуемой системы S^H общие характеристики динамической абстрактной модели с неизвестной правой частью

$$\dot{x} = f(x, u), \quad (1)$$

где x – вектор состояния; u – вектор внешних воздействий. Математик задает общую размерность фазовой переменной x , эксперты-предметники определяют входы и их размерности по подсистемам. Далее указывается семейство опорных точек (\bar{x}, \bar{u}) , которые известны независимо от модели из некоторой совокупности наблюдений над системой. В результате модель (1) рассматривается как линейная относительно семейства опорных (\bar{x}, \bar{u}) :

$$\dot{x} = A(x - \bar{x}) + B(u - \bar{u}), \quad x \in R^n, \quad u \in R^k, \quad u \in R^k, \quad (2)$$

где $A = [a_{ij}]$ и $B = [b_{ik}]$ – матрицы, $i, j \in J$, $k \in K$, J – множество индексов размерности n , K – множество индексов размерности m . Использование линейных соотношений важно в условиях дефицита информации, так как количество необходимых данных для идентификации модели при разложении неизвестной функции f минимально по сравнению с нелинейными структурами.

При условии фиксирования переменных появляется возможность определить содержательную интерпретацию величин a_{ij} , b_{ik} , что, в свою очередь, позволяет получать их значения посредством имитации натурального эксперимента. Комплекс мероприятий, связанных с получением необходимой информации для реализации такой имитации и определения конкретных коэффициентов взаимодействия между отдельными компонентами моделируемого объекта называется *идеализированным экспериментом*.

² 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

Для реализации первого этапа процесса исследования медико-эколого-экономических систем, в котором принимает участие L экспертов-предметников, предлагается общий алгоритм для определения структуры и параметров математической модели изучаемой системы, основанный на линейных аппроксимациях, идеализированном эксперименте и экспертных оценках:

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

$$P_A = \{(a_{ij}, p_{ij}^a), i = 1, \dots, n; j = 1, \dots, n\}, P_B = \{(b_{ik}, p_{ik}^b), i = 1, \dots, n; k = 1, \dots, m\},$$

где p_{ij}^a и p_{ik}^b – содержательная информация, связанная с некоторым параметром модели a_{ij} или b_{ik} соответственно.

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

$$M(a_{ij}, b_{ik}, \bar{x}_i, \bar{u}_k, q_z, X_i, X_j, U_k), \quad (3)$$

где $i, j \in J^l \subset J$, $k \in K^l \subset K$, $z \in Z$, 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^l и P_B^l 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.

Поясним предложенный алгоритм на примере наиболее простого типа компонентного эксперимента – однокомпонентного. На первом этапе однокомпонентного эксперимента используются следующие допущения:

- 1) условия реализуются на периоде времени $[t_n, t_k]$;
- 2) фиксируется некоторый показатель x_i модели (2);
- 3) другие переменные задаются следующим образом:

$$x_j = \bar{x}_j, \forall j \neq i \text{ и } u_k = \bar{u}_k, \forall k.$$

В результате наблюдаются изменения только одной величины – x_i и получается некоторый *новый объект*, и соответствующая ему специальная модель $M_{1x_i}^{(комм)}$ будет иметь вид:

$$\dot{x}_i = a_{ii}(x_i - \bar{x}_i), t \in [t_n, t_k].$$

Пусть X_i^n, 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_n и t_k), а в условиях дефицита информации и невозможности проведения активных экспериментов как задаваемые экспертом оценки. В последнем случае, например

для X_i^n , имеем: $X_i^n = \sum_{l=1}^L \alpha_l^n F_i^l$, 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

$\sum_{l=1}^L \alpha_l^n = 1, \alpha_l^n \geq 0$; X_i^n – взвешенная количественная оценка. В данном случае в

терминах обобщенного алгоритма для $M_{1x_i}^{(комм)}$ имеем $q = \{\alpha_l^n, \alpha_l^k\}$. Тогда для параметра a_{ii} можно получить следующее аналитическое представление

$$a_{ii} = [1/(t_k - t_n)] \cdot \ln |(X_i^k - \bar{x}_i)/(X_i^n - \bar{x}_i)|, \quad (4)$$

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 $M_{1x_j}^{(комм)}$ ($M_{1u_k}^{(комм)}$):

$$\dot{x}_i = a_{ii}(x_i - \bar{x}_i) + a_{ij}(x_j - \bar{x}_j), \dot{x}_i = a_{ii}(x_i - \bar{x}_i) + b_{ij}(x_j - \bar{u}_k), \quad (5)$$

$$a_{ij} = a_{ii}(X_i^k - \bar{x}_i - e^{a_{ii}(t_k - t_n)}[X_i^n - \bar{x}_i]) / ((X_j - \bar{x}_j)[\exp(a_{ii}(t_k - t_n)) - 1]), \quad (6)$$

$$b_{ik} = a_{ii}(X_i^k - \bar{x}_i - e^{a_{ii}(t_k - t_n)}[X_i^n - \bar{x}_i]) / (U_k - \bar{u}_k)[\exp(a_{ii}(t_k - t_n)) - 1], \quad (7)$$

где X_i^n, X_i^k, X_j, U_k – взвешенные количественные экспертные оценки, для $M_{1x_j}^{(комм)}$ имеем $q = \{\alpha_{il}^n, \alpha_{il}^k, \alpha_{jl}\}$. По аналогичной схеме могут быть построены многокомпонентные эксперименты.

Специальная модель M может быть получена не только как преобразование соотношений (2), но и как новая модель, описывающая понятные эксперту количественные соотношения, связанные с содержательным смыслом определяемых параметров a_{ij}, b_{ik} . Обозначим такой тип моделей как

$M^{(ПО)}$. Разработка $M^{(ПО)}$ предполагает проведения исследований с использованием новой информации, которая отражается в $M^{(ПО)}$ через параметры q . Отметим, что множество параметров q можно разделить на два типа: q_{ds} – непосредственно относящиеся к предметному смыслу коэффициента (например, технологические коэффициенты) и q_{ss} – специфические для объекта моделирования (например, численность населения, площадь региона и т.п.).

Модель $M^{(ПО)}$ в конечном счете задает некоторую вычислительную формулу. Однако, на практике, особенно при исследовании многорегиональных медико-эколого-экономических систем, из-за дефицита информации не всегда можно непосредственно применять такие формулы. В этом случае организуется специальная процедура, называемая в диссертации «тиражированием», которая использует значения известных параметров a_{ij}^B , b_{ik}^B , q_{ss}^B , полученных при моделировании некоторой аналогичной в некотором смысле системы S^B , для вычисления a_{ij}^H , b_{ik}^H , q_{ss}^H модели системы S^H :

$$a_{ij}^H = a_{ij}^B \prod_{\tau=1}^{s(i,j)} K_{\tau}, \quad b_{ik}^H = b_{ik}^B \prod_{\tau=1}^{s(i,k)} K_{\tau}, \quad (8)$$

где K_{τ} – масштабирующие коэффициенты, определяемые в зависимости от содержательного смысла параметра a_{ij} (b_{ik}) и соотношений между q_{ss}^H и q_{ss}^B . При тиражировании параметра желательно выбирать такой аналог исследуемой системы, где сходны технологические, климатические, социальные условия. В первой и третьей главах приведены примеры использования процедуры тиражирования.

Следующим этапом исследования медико-эколого-экономических систем являются вычислительные эксперименты с построенными математическими моделями. Для проведения вычислительных экспериментов используется сценарный подход. Сценарии формируются двумя способами. Первый способ предполагает создание нового сценария на основе комбинации стандартных именованных сценариев: «пропорциональный рост», «перераспределение инвестиций», «альтернативное развитие», «природоохранные мероприятия», «сценарии внедрения инноваций», «сценарии ресурсосбережения». При использовании второго способа создается квази оптимизационный сценарий, основанный на приближенном магистральном решении медико-эколого-экономических задач (описаны в приложении Г).

В третьей главе рассматривается методическое, алгоритмическое и программное обеспечение, применяемое для исследования региональных медико-эколого-экономических систем с использованием описанных в главе 2 подходов и методов. Предлагается методика интерактивного поэтапного построения модели, которая задает информационные структуры и процедуры их обработки для реализации общего алгоритма формирования модели на основе экспертной системы, состоящей из следующих основных блоков.

Информационно-логическое описание предметной области (ЛОПО), в которой содержится информация об основных элементах и отношениях исследуемой системы с точки зрения эксперта-предметника. В ЛОПО базовые

элементы системы задаются с помощью фрейма «фактор». При исследовании конкретных систем с помощью фрейма «фактор» могут быть описаны, например, различные виды заболеваемости населения, отрасли экономики, характеристик природной среды и др. Фреймы связаны различными типами отношений, наиболее существенными из которых являются «причинно-следственное отношение» и «ассоциативное отношение» (необходимое для задания аналогов фактора, что может использоваться, например, в процедуре тиражирования). *Информационно-логическое описание объектов и методов моделирования* (ЛООММ), содержащая информацию о модели с точки зрения математика и программиста. В этом описании множество объектов, которые используются в процессе формирования модели, разделено на 4 группы: множество переменных модели; множество математических соотношений модели; множество методов определения параметров модели; множество процедур исследования модели *Процедуры формирования моделей* (ПФМ), под которыми понимаются типовые процедуры, возникающие при построении и исследовании моделей систем для конкретных классов задач. Применение ПФМ позволяет задавать связь между формализованными вычислительными процедурами и неформализованными методами решения задач, основанными на знаниях и опыте экспертов. ПФМ задаются множеством продукций, обрабатывающим информацию из ЛОПО и ЛООММ. В главе описана структура ПФМ, способ обмена информацией между ПФМ и алгоритм их применения на основных этапах формирования модели. На третьем этапе из объектов ЛООММ составляется математическая модель.

Для реализации предложенной методики разработан интеллектуальный программный комплекс (ИПК), который включает в себя следующие модули: «Расчет»; «Расчет–CLIPS»; «Protégé»; «Конвертор», взаимодействие которых представлено на рисунке 1.

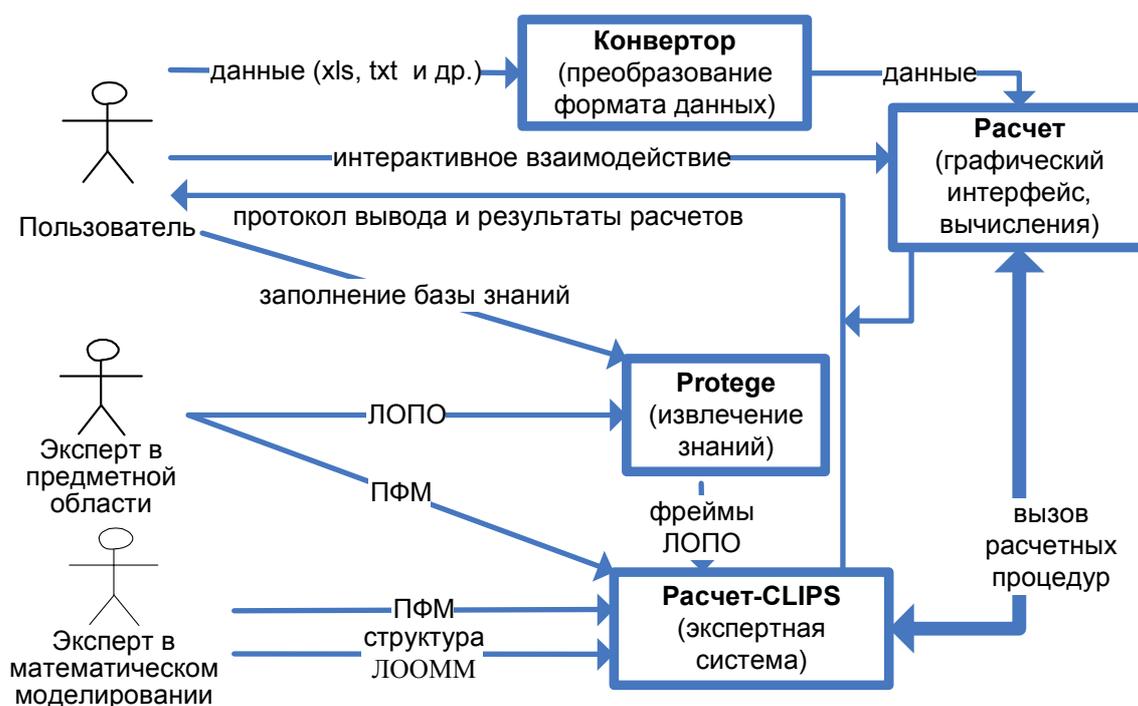


Рисунок 1 – Архитектура программного комплекса

При разработке ИПК использовались следующие свободно распространяемые программные средства: Clips, Protege, Twiki, Eclipse. Для определения структуры ЛОПО инженером по знаниям совместно с экспертами в предметной области используется средство извлечения знаний Protege. Для заполнения пользователями ЛООММ фреймами-образцами (возможно при помощи инженера по знаниям) тоже используется Protege. Для преобразования информации из разных форматов (например, MS Excel) в форматы ИПК используется модуль «Конвертор». Для автоматизации вычислительных процедур, ввода и редактирования данных, проведения расчетов с формируемой моделью используется модуль «Расчет». Для обработки знаний, представленных в форме продукций и фреймов, используется модуль «Расчет-CLIPS».

В четвертой главе представлены результаты применения разработанных методов и средств для построения и исследования: эколого-экономической модели Европейской и Азиатской части России [3, 11]; медико-эколого-экономической модели регионов Сибири [5, 11]; модели динамики заболеваемости населения города Ангарска Иркутской области [1, 2]; модели динамики заболеваний населения г. Улан-Батор (Монголия) [8]. Дается подробное описание структуры построенных моделей, приведены примеры использования компонентных экспериментов и процедур тиражирования. Представлены результаты вычислительных экспериментов.

Эколого-экономическая модель Европейской и Азиатской части России является развитием существующего варианта модели межотраслевого баланса СССР, разработанного сотрудниками Института экономики и организации промышленного производства (ИЭОПП СО РАН) и Объединенного института истории, филологии и философии (ОИИФФ СО РАН). Для моделирования были выбраны две территории: Азиатская и Европейская части России (АЧР и ЕЧР) с системой показателей по экономическому и экологическому блокам.

В модели рассматриваются следующие отрасли экономики (единицы измерения – млрд. руб.): 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 ($\text{м}^3/\text{га}$); площадь сельскохозяйственных земель (га); запасы биоресурсов (тыс. руб.); запасы минеральных ресурсов (тыс. руб.).

Параметры экологического блока модели АЧР и ЕЧР были определены с использованием процедуры тиражирования, где в качестве контрольных регионов выступали Иркутская область и Республика Бурятия. В отсутствии данных о выбросах по конкретным загрязнителям предполагалось, что структура выбросов для отрасли j на единицу производства в базовой модели сохраняется для j -ой отрасли исследуемой модели. Для проведения вычислительных экспериментов с моделью был использован сценарий «сдвиг на запад», реализующий альтернативный вариант развития АЧР и ЕЧР в период с 1959 по 1989 годы путем отказа от активной индустриализации АЧР и созданием новых

мощностей в ЕЧР. Вычислительные эксперименты позволили подтвердить гипотезы, принятые еще в исходной экономической модели. В частности, расчеты показали, что развитие отраслей тяжелой промышленности преимущественно в ЕЧР (рисунок 2) оказывает значительное негативное воздействие на состояние окружающей среды (рисунок 3). Поэтому экономическое освоение АЧР является обоснованным не только с экономической, но и с экологической точки зрения.

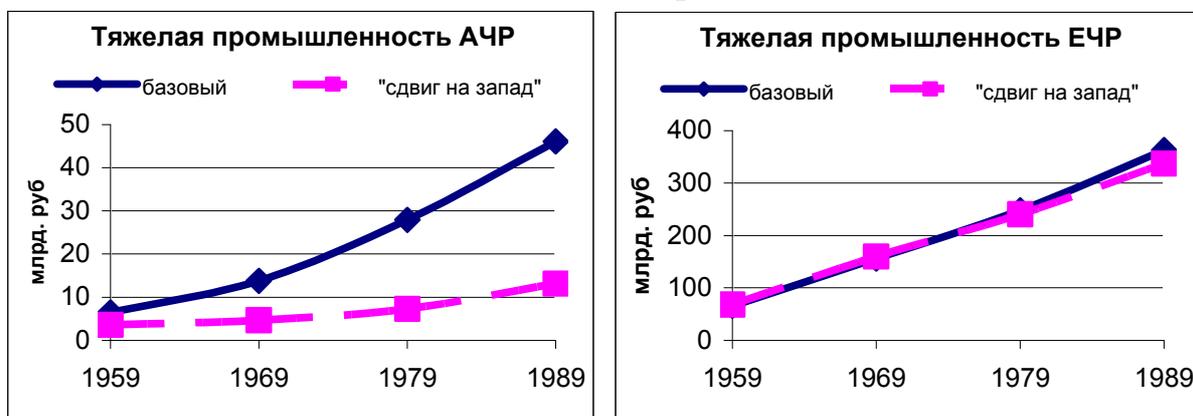


Рисунок 2 – Динамика выпуска в тяжелой промышленности в АЧР и ЕЧР

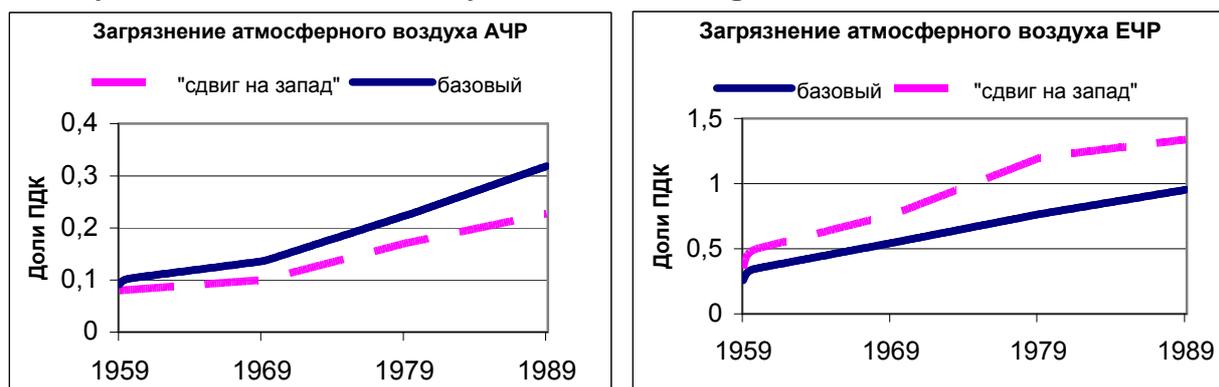


Рисунок 3 – Динамика экологических показателей в АЧР и ЕЧР

В *медико-эколого-экономической модели регионов Сибири* рассматривается 38 отраслевая номенклатура экономического блока и 8 переменных, характеризующих медико-экологическое состояние каждого региона. Были проведены вычислительные эксперименты и определены регионы с неблагоприятной медико-экологической обстановкой. Для анализа возможностей улучшения медико-экологического состояния был сформирован сценарий экологического развития регионов, который предусматривал снижение выпуска по отраслям экономики, оказывающим наиболее существенный вклад в общую экологическую нагрузку. Результаты расчетов показали, что для улучшения состояния региона в среднем на 15-20% по таким показателям как загрязнение атмосферного воздуха, заболеваемость населения, загрязнение воды и запас леса необходимо ограничить производство, что приведет к снижению конечного суммарного потребления по всем рассматриваемым регионам на 4%.

Модель динамики заболеваемости населения использовалась для описания эколого-экономических процессов г. Ангарска Иркутской области. Проведены сценарные расчеты (таблица 1). Применение методики поэтапного

интерактивного формирования модели позволило на основе опросов экспертов смоделировать данные для проведения компонентных экспериментов и определить по формулам (3)-(5) параметры модели, отражающие взаимовлияние различных классов болезней друг на друга и влияние загрязнения атмосферного воздуха на заболеваемость населения.

Таблица 1 – Результаты расчета сценария «Уменьшение выбросов оксидов азота и взвешенных веществ ТЭЦ и АНХК» для болезней органов дыхания

Показатель заболеваемости для возрастных групп	Уменьшение показателя заболеваемости	Уменьшение числа обращений	Уменьшение реального экономического ущерба (тыс. р.)
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

Сценарный анализ основан на вариантах улучшения экологической обстановки в городе за счет уменьшения выбросов оксидов азота и взвешенных веществ на крупных предприятиях (таблица 1). Для наблюдаемого в сценарии снижения уровня заболеваемости получена экономическая оценка.

Модель динамики заболеваемости населения города Улан-Батор населения описывает влияние загрязнения атмосферного воздуха и температуры на число случаев заболевания. В диссертации приведены два варианта модели с учетом и без учета возрастной структуры населения.

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 моделей. В **приложении В** описываются методики оценки сценарных расчетов для моделей динамики заболеваемости населения. В **приложении Г** описывается процедура исследования медико-эколого-экономических задач оптимального управления с применением магистральных решений.

III. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Разработан алгоритм и процедуры построения математической модели медико-эколого-экономической системы в условиях дефицита статистической информации с использованием линейных аппроксимаций и экспертной информации. Предложена методика идентификации параметров медик-эколого-экономической модели, позволяющие моделировать данные для проведения компонентных экспериментов на основе экспертных знаний о закономерностях в исследуемой предметной области. Предложен алгоритм «тиражирования» многорегиональных медик-эколого-экономической моделей, предполагающий использование информации из моделей контрольных регионов для

идентификации параметров исследуемого региона при применении предметно-ориентированных методик.

2. Разработана методика поэтапного интерактивного формирования медико-эколого-экономической модели с использованием экспертной системы. Реализация методики осуществляется в рамках разработанного интеллектуального программного комплекса (ИПК) «МЭЭМ», который используется для поддержки процесса исследования региональных медико-эколого-экономических систем.

3. 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).

IV. СПИСОК ОСНОВНЫХ РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ:

а) статьи в рецензируемых научных журналах, определенных ВАК Министерства образования и науки РФ

1. Батулин, В.А. Использование математического моделирования при идентификации экологически обусловленных заболеваний / В.А. Батулин, Н.В. Ефимова, А.Б. Столбов, Д.Е. Урбанович // Бюллетень Восточно-Сибирского научного центра СО РАМН. – 2005. – №8. – С. 11-15 (0,3 п.л. / авторские – 0,06 п.л.).

2. 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 (0,3/0,1 п.л.).

3. Батулин, В.А. Сценарный анализ эколого-экономического развития Азиатской части России / В.А. Батулин, В.В. Воробьева, В.Ю. Малов, Б.В. Мелентьев, А.Б. Столбов // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2009. – № 4. – С. 13-18 (0,375/0,09 п.л.).

4. Батулин, В.А. Применение медико-эколого-экономических моделей для прогнозирования динамики заболеваемости населения / В.А. Батулин, Н.В. Ефимова, В.Ю. Малов, Б.В. Мелентьев, А.Б. Столбов // Информатика и системы управления. – № 2. – 2010. – С. 199-202 (0,18/0,036 п.л.).

5. Батулин, В.А. Система сценариев для анализа развития байкальского региона на основе медико-эколого-экономических моделей / В.А. Батулин, 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) (0,35/0,09 п.л.).

6. 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 (0,4/0,2 п.л.).

7. 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 (0,65/0,14 п.л.).

8. 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 (0,25/0,03 п.л.).

б) статьи в других изданиях и научных журналах, материалах конференций, сборниках научных трудов

9. 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». – 2011. – Т. 5.– С. 135-140 (0,3 п.л.).

10. Столбов, А.Б. Исследование магистральных решений в медико-эколого-экономических задачах / А.Б. Столбов // Материалы VI международной научной конференции «Системный анализ в медицине», Благовещенск. – 2012. – С. 15-18 (0,2 п.л.)

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 (0,5/0,09 п.л.).

12. Азиатская часть России: моделирование экономического развития в контексте опыта истории / отв ред. В.А. Ламина, В.Ю. Малов. – Новосибирск: Издательство СО РАН, 2012. – 464 с. (30/0,5 п.л.).

Подписано в печать 19.09.2016 г.

Формат бумаги 60 × 84 1/16. Бумага офсетная.

Печать трафаретная. Печ. л. 1. Заказ 5243. Тираж 100 экз.

Отпечатано с готового оригинал-макета в ИПО ФГБОУ ВО

«Байкальский государственный университет»

664003, г. Иркутск, ул. Ленина, 11.