А. Б. Столбов

Программное обеспечение комплексных исследований социо-эколого-экономических систем на основе моделей «Регион»: аналитический обзор

Аннотация. В статье представлен исторический обзор и текущее состояние в области разработки программных комплексов, предназначенных для обеспечения процесса исследования социо-эколого-экономических систем на основе моделей «Регион». Обзор охватывает разработки в период с середины 1970-х годов по настоящее время. На основе анализа публикаций, отчетов и, где это было возможно, документаций проведен анализ архитектур программных систем, их основных функций и способов реализации. Модели программ представлены на языке UML с применением диаграммы прецедентов и компонентов. К основным задачам, решаемым рассматриваемыми программными комплексами, относятся следующие: вычислительный эксперимент и сценарные расчеты, решение задач оптимизации и нормирования, анализ свойств модели и идентификация параметров. В зависимости от набора решаемых задач и моделируемых компонент социо-эколого-экономических систем выполнена классификация множества программ, сделаны выводы о вкладе отдельных разработок в общий фонд программного обеспечения моделей «Регион», проведена оценка дальнейших перспектив исследований в данном направлении.

Ключевые слова и фразы: программное обеспечение, социо-эколого-экономические системы, аналитический обзор.

Введение

Активное развитие направления, связанного с математическим моделированием эколого-экономических систем начинается в конце 1960-х годов. Широко известна одна из первых работ в этом направлении – расширенная модель межотраслевого баланса Леонтьева-Форда [1, 2]. В СССР и за рубежом в 70-80-е гг. XX в. вопросами эколого-экономического моделирования занимались коллективы под руководством Х. Айзарда [3], М. Я. Антоновского [4], А. Б. Горстко [5]; К. Г. Гофмана [6], В. И. Гурмана [7]; В. И. Денисова [8], С. В. Дубовского [9];

Д. Медоуз [10], Н. Н. Моисеева [11]; Дж. Форрестер [12] и многие другие исследовательские группы. В данной статье рассматривается направление, развиваемое В.И. Гурманом и его учениками.

В период с 1975 по 1990 гг. большим исследовательским коллективом, насчитывающим более 40 ученых, под общим руководством В.И. Гурмана разработан *комплекс моделей* под условным названием «Регион» [13], который включает в себя математические модели, описывающие разнообразные аспекты поведения эколого-экономических систем на трех взаимосвязанных иерархических уровнях. На верхнем (первом) уровне находится макро модель, включая модель межотраслевого баланса, с агрегированными показателями по компонентам эколого-экономической системы. На следующем (втором) уровне расположены более детальные модели компонентов природной среды: распространение примесей в атмосфере или реке, динамика био-и лесных ресурсов и т.п. На третьем уровне представлены еще более частные модели, включая модели уникальных объектов. В дальнейшем эколого-экономические модели были расширены до социо-эколого-экономических [14] и медико-эколого-экономических [15].

В процессе построения и применения комплекса моделей «Регион» решен широкий круг разнообразных задач, связанных со статистической обработкой данных, определением параметров, прогнозированием, оптимизацией и др. Все это множество задач требовало разработки соответствующего набора программ, предназначенных для поддержки вычислений, обработки и хранения информации. В то же время комплексный характер проводимых исследований привел к пониманию необходимости интегрирования программного и информационного обеспечения для создания единой системы поддержки расчетов на основе моделей «Регион».

На процесс разработки программного обеспечения влияли следующие факторы:

- (1) развитие аппаратной базы (ЕС ЭВМ, персональный компьютер, супер ЭВМ) и операционных систем (ОС ЕС, MS DOS, Windows);
- (2) появление и расширение доступности новых технологий (Интернет, высокопроизводительные вычисления, экспертные системы);
- (3) развитие моделей и методов их построения, включая добавление в анализ новых компонент социо-эколого-экономической системы (показатели здоровья населения, инновации);
- (4) изменение политической и экономической обстановки в 1990-е годы, которое привело к сокращению и дроблению состава исследовательского коллектива.

Таким образом, начиная с середины 1970-х годов, создано большое количество программных систем, а связанные с ними результаты отражены в серии отчетов, статей и монографий. Однако в этих публикациях, за редким исключением, внимание уделяется, прежде всего, описанию особенностей конкретной программной реализации отдельно от всего множества программ и вне его контекста. В результате к настоящему времени нет работ, в которых ставилась бы цель описать, проанализировать и обобщить накопленный опыт в области создания и применения программного обеспечения, используемого для поддержки исследований на основе моделей «Регион». Данная статья призвана заполнить этот пробел, при этом в обзор включаются только те разработки, которые тем или иным образом непосредственно связаны со спецификой моделирования социо-эколого-экономических систем. Поэтому в обзоре не рассматривались специализированные программные системы для проведения оптимизационных численных расчетов, например, ПСИ [16] или OPTCON [17], хотя они и были использованы в некоторых расчетах с моделями «Регион».

В первом разделе статьи на содержательном уровне без привлечения математического аппарата кратко описывается модельный комплекс «Регион», который включает в себя все известные автору статьи модели, разработанные к настоящему времени. Перечисляются основные методы, используемые при создании и исследовании моделей «Регион». В последующих разделах приводится хронологический обзор основных программных разработок с выделением их ключевых функций. Для описания программных систем используются диаграммы UML. В заключительном разделе осуществлено сравнение программ между собой по различным критериям: решаемые задачи, моделируемые компоненты системы, используемые программно-аппаратные средства и др. В заключении сделаны общие выводы и приведена оценка направлений дальнейших исследований.

1. Модельный комплекс «Регион»

Под системой моделей и модельным комплексом согласно [18] принято понимать следующее. *Комплекс моделей* — совокупность моделей, предназначенных для решения одной сложной задачи, каждая из которых описывает тот или иной аспект моделируемого объекта либо процесса на своем, соответствующем этому аспекту языке предметной области. Если же модели связаны так, что результаты одних оказываются исходными данными для других, то комплекс моделей называется *системой моделей*.

Рис. 1. Иерархия моделей «Регион»

Комплекс моделей «Регион» имеет трехуровневую иерархическую структуру, причем модели первого и второго уровня в общем случае явно взаимосвязаны. Математическое описание моделей «Регион» подробно представлена в серии публикаций [7, 13–15, 19–22]. В данной работе представим модельный комплекс в форме диаграммы (рис. 1), основанной на схеме из монографии [20, с. 21].

К наиболее проработанным и объемно представленным в открытой печати моделям относятся:

- (1) Эколого-экономическая модель [13, с. 8].
- (2) Социо-эколого-экономическая модель, включая компонент инноваций [14].
- (3) Медико-эколого-экономическая [15, 22].
- (4) Ресурсно-экономическая [19, с. 98].
- (5) Заболееваемость населения [15, 22].
- (6) Река [13, с. 118; 23].

- (7) Воздух [24, 25].
- (8) Лесные ресурсы и лес [7, с. 231], [13, с. 130; 26].
- (9) Демография, динамика популяций [7, с. 199].

В рамках методологии разработки моделей «Регион» основными методами создания и исследования являются:

- (1) статистическая обработка экспериментальных данных;
- (2) идентификация;
- (3) анализ свойств модели;
- (4) прогноз (сценарные расчеты);
- (5) оптимизация (магистральные режимы, методы последовательных улучшений);
- (6) нормирование;
- (7) построение множества достижимостей управляемых систем;
- (8) агрегирование и декомпозиция;
- (9) дискретизация;
- (10) формализация предметной области и обработка знаний.

Программные реализации представленных моделей и методов их исследования, разработанные на протяжении 40 последних лет, составляют основу рассматриваемого в следующих разделах программного обеспечения исследований социо-медико-эколого-экономических систем на основе модельного комплекса «Регион».

2. Система эколого-экономических расчетов

2.1. Общая характеристика

К началу 1980-х годов сформулированы основные идеи методологии построения моделей «Регион» [19], проведены вычислительные эксперименты и решён ряд содержательных задач: экологический прогноз до 2000 года для Байкальского региона по нескольким вариантам развития хозяйства; прогноз состояния лесных ресурсов Нижнего Приангарья; оценка эффекта от внедрения технологий, ориентированных на отходы; планирование водоохранных мероприятий в системе «река Селенга»– «Байкал» и многие другие. Для проведения численных расчетов для решения подобных задач создавались отдельные программы, однако, исходя из полученного опыта и специфики моделируемых объектов, была очевидна необходимость интегрирования программного и информационного обеспечения в рамках единой системы, которая позволяла бы

- (1) оперировать множеством расчетных программ, направленных на решение различных и зачастую взаимосвязанных задач;

Рис. 2. Структура СЭЭР

- (2) обрабатывать и хранить разнородную информацию, обеспечивать доступ программ к этой информации;
- (3) иметь предметно-ориентированный пользовательский интерфейс для математиков, экспертов-предметников и специалистов плановых органов.

В результате параллельно с разработкой моделей «Регион» и методов их исследования была сформулирована проблема создания программной системы, позволяющей организовать решение расширяемого комплекса гетерогенных по структуре и содержанию задач на единой информационной базе средствами единого программного обеспечения и интерфейса пользователя [26]. Основным назначением такой программной разработки являлось системно-сервисное и информационное обеспечение системы эколого-экономических расчетов (СЭЭР). Структура программы из монографии [27] изображена на рис. 2. В дальнейшем «обеспечивающая» часть СЭЭР получила собственное название — САРМА (система автоматизации расчетов, моделирования, анализа). В связи с тем, что существует еще один вариант реализации СЭЭР, который будет рассмотрен в следующем разделе, данную разработку будем называть СЭЭР САРМА.

Функциональная часть СЭЭР САРМА включает набор программных модулей, реализующих абстрактные модели, множество вычислительных процедур и информационные хранилища. Элементы функциональной части разрабатывались для ЕС ЭВМ и операционной

системы ОС ЕС, а для хранения информации использовались либо средства ОС ЕС (наборы данных), либо БД САРМА, являющуюся надстройкой над БД ИНЕС [28].

СУБД ИНЕС (информационная единая система) является иерархической базой данных, поддерживающей модель данных с характерными свойствами семантических моделей. СУБД ИНЕС в 1980-х годах была самой популярной в СССР и активно применялась на предприятиях и в организациях. В СЭЭР САРМА создание надстройки над ИНЕС заключалось, прежде всего, в модификации метода ведения многоуровневой системы ссылок, отличающихся от ссылок ИНЕС радиусом действия и динамикой создания, что позволило избежать дублирования в элементах ключевых массивов (например, «список названий», «термин предметной области», «массив элементов модели» и т.п.).

Таким образом, имеющийся в наличии к началу 1980-х годов набор программно-технических средств оказал существенное влияние на круг решаемых при разработке СЭЭР САРМА задач. В частности, много сил и внимания было посвящено созданию вспомогательных процедур для эффективного использования оперативной памяти, обмена информацией между модулями, взаимодействия с устройствами ввода-вывода, а также проектированию и реализации пользовательского интерфейса. При разработке СЭЭР САРМА проводились эксперименты по определению требуемых объемов памяти и по анализу времени доступа к БД для разных режимов работы. К настоящему времени эти разработки потеряли свою актуальность, однако архитектурные и методические решения по-прежнему представляют интерес. Так, при создании СЭЭР САРМА сконструированы гибкие структуры представления информации, определяющие механизмы преобразования содержательной информации во внутренний универсальный код, что обеспечивало настройку системы на предметную область.

2.2. Реализация СЭЭР САРМА

САРМА, обеспечивающая часть системы СЭЭР САРМА, состоит из независимых программных модулей и не имеет объединяющего их ядра. Программные модули системы САРМА привязаны к структуре базы данных и решают конструктивные и интерфейсные задачи для

Рис. 3. Варианты использования обеспечивающей части SARMA

функциональных компонент СЭЭР (рис. 3). Модульная структура СЭЭР SARMA позволяет подключать функциональные программные модули к разрабатываемой системе, а также расширять функциональную часть, что дает возможность независимо использовать функциональные программы в разных приложениях.

Настройка на предметную область. Универсальные схемы хранения данных в БД SARMA требуют уровни адаптации к структурам данных предметной области программ моделирования. Для этого специальным образом в БД фиксируется структура пространств фазовых и управляющих переменных моделей. В ходе этой процедуры в БД вводится и вся терминология, необходимая для ведения с пользователем диалога в предметных терминах.

Настроенная на предметную область СЭЭР SARMA реализует собственные операции для обработки, обмена и отображения информации из БД SARMA. При этом обращение и представле-

ние происходит в содержательных терминах. Если расширяемость функциональной части СЭЭР САРМА осуществляется в неавтономном режиме, то эти операции используются непосредственно в коде программы как вызов процедур. Кроме этого способа функциональные программы могут (в случае автономного включения — всегда) получать информацию из наборов данных ОС ЕС.

Диалог. Предусмотрено два типа диалогов: вопрос-ответ и заполнение таблиц. Точки диалога встраиваются в программу в форме обращения к специализированной процедуре.

Подготовка сценариев для вариантных расчетов, которая предполагает выполнение ряда операций с данными и специальных вспомогательных вычислительных экспериментов (например, по оценке фазовых состояний динамических систем, оценке множеств достижимости). Параметры моделей и расчетные сценарии могут вводиться в БД как в диалоговом, так и в пакетном режимах. При этом система автоматически генерирует формы ввода. Имеется возможность готовить на основе одного базового сценария различные его модификации.

Организация вычислительных экспериментов с вариантными (сценарными) расчетами и *оптимизация*. По запросу пользователя может быть вызван на расчет любой сценарий, хранящийся в БД САРМА. Преобразование данных, если это необходимо, производится автоматически. Необходимо отметить, что в САРМА общая процедура была реализована лишь для вариантных расчетов, но допускала многократное решение оптимизационной задач в режиме варьирования параметров, но без учета специфических особенностей процедуры выбора оптимального управления, т. е. по схеме «задание вариантов начальных условий и управлений — запуск программы оптимизации — вывод конечных результатов».

Анализ информации. В диалоговом режиме осуществляется редактирование и вывод информации вычислительных экспериментов. Показатели могут быть выведены в виде графиков и таблиц. Имеются широкие возможности для сопоставления различных сценариев: может быть задана формула выводимого показателя — имя одного массива данных задачи или нескольких массивов, соединенных операциями матричной алгебры.

Программа ORG организации процесса моделирования в режиме диалога. Программа строится в виде интерфейсного модуля, объединяющего функциональные и системные модули в соответствии с логикой вариантных расчетов. Перепрограммируя ORG можно

получать новые версии СЭЭР.

Для реализации СЭЭР САРМА использованы различные системы программирования: Ассемблер для обеспечения взаимодействия с ОС ЕС и устройствами ввода-вывода; Фортран и ПЛ-1 для реализации функциональных и сервисных компонент, а также взаимодействия с модулями ИНЕС.

С применением СЭЭР САРМА выполнялись расчеты для двух-уровневой модели «Регион», а также разработаны ППП «Лес Иркутской области» и ППП «Эллипс», предназначенный для исследования множества достижимости линейных систем.

Опыт применения СЭЭР САРМА показал, что вариант объединения всех моделей и методов в единый программный комплекс с общим системным сервисом и базой данных является трудоемким в реализации. Кроме того, в связи с его использованием вставали серьезные проблемы эксплуатации в условиях малой надежности и ограниченности имеющихся вычислительных ресурсов ЕС ЭВМ. В конце 1980-х годов начинается разработка «упрощенного» варианта СЭЭР – пакет прикладных программ «Регион», где от идеи комплексирования моделей, методов и разнородной информации в рамках одного ППП отказались. Разработка и использование СЭЭР САРМА прекратились в 1989 году в связи с изменением конфигурации системного обеспечения Иркутского вычислительного центра.

2.3. Пакет прикладных программ «Регион»

ППП «Регион» [29] в отличие от СЭЭР САРМА построен на базе комплекса только автономных функциональных программ (ФП), т.е. без использования специальных методов обработки информации, предоставляемых БД САРМА. ППП «Регион» работает в режиме вариантных расчетов: пользователь готовит и передает системе варианты исходных данных для моделей и инициирует выполнение сценарных расчетов. Система допускает включение новых моделей в виде ФП, новых сценариев для расчетов и новых сценариев диалога. Таким образом, основными задачами ППП «Регион» являются:

- (1) формирование сценариев,
- (2) прогнозные расчеты,

- (3) сравнение и оценка сценариев,
- (4) вывод разнообразной информации в удобном для пользователя виде (таблицы, графики, карты, диаграммы).

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, запускаемых независимо друг от друга;
- (2) организация требуемой последовательности вызова и выполнения ФП;
- (3) обеспечение диалогового взаимодействия с пользователем.

Основные проблемы проектирования заключались в унификации механизма передачи параметров и подключения набора данных для совместного использования независимо изготовленных ФП. Для решения этих проблем наборы данных (НД) ППП «Регион» подразделяются на системные (случайные), функциональные (для расчетных программ) и наборы для печати и отладки. НД объединяются в группы по содержанию хранящейся в ней информации и структурно-логическому устройству. Например, данные, связанные со сценарными расчетами для модели верхнего уровня делятся на 6 групп (далее суффикс i обозначает номер сценария):

- REG.BASE.COEf – базовый набор информации, который не меняется при расчете конкретного сценария и содержит матрицы коэффициентов и другие параметры модели;
- REG.COEf.VAR i – поправочные коэффициенты к базовому для различных сценариев;
- REG.YPRV.VAR i – начальное состояние, заданное управление и расчётное состояние для различных сценариев (на 20 лет);
- REG.REST.VAR i – вспомогательные расчётные характеристики, например, фондообразующие затраты, затраты продукции на производство, отраслевая структура потребления, для каждого шага по времени (лет) для различных сценариев;
- REG.INPT.VAR i – дополнительная входная информация, включая размерности векторов, количество районов, параметры численных методов, время выхода на магистраль, варианты изменения цен по отраслям и др.;

Рис. 4. Механизм связи групп наборов данных и файлов для некоторой функциональной программы

REG.OUTP.VAR*i* – дополнительная выходная информация.

Во всех ФП выделяют имена файлов, при помощи которых производится обращение к наборам данных, причем каждому файлу может соответствовать только одна группа НД. Под *расчетным сценарием* понимается множество НД, с которым будет взаимодействовать подготавливаемая к работе программа при проведении конкретных расчетов. Сценарии объединяются в множество или *банк сценариев*. Иллюстрация такого подхода к организации данных сценариев и некоторой ФП представлена на рис. 4.

Для выполнения сервисных работ по обслуживанию системных НД программы RGN (например, представленных на рис. 4) реализована вспомогательная диалоговая программа SERV, которая предоставляет средства для конфигурирования ФП и исходных данных сценарных расчетов – формирования и корректировки банка расчетных сценариев, каталога функциональных программ и сценария основного диалога. Программа SERV независима от ППП «Регион» и

исполняется отдельно. При помощи SERV создаются специализированные варианты ППП «Регион», ориентированные на разные группы сценариев и пользователей.

В процессе создания и использования ППП «Регион» принимают участие следующие специалисты:

- системный программист* разрабатывает RGN и SERV, включая подпрограммы отображения информации и обеспечения доступа к данным;
- программист* создает расчетные программы RGN, осуществляет конфигурирование функциональных программ RGN с использованием SERV;
- специалист в области моделирования* выполняет расчеты с готовым вариантом RGN, формирует и редактирует данные, применяемые в расчетах с использованием SERV.

Для выполнения вычислительных экспериментов по сценариям созданы следующие варианты программ прогнозных расчетов:

- PROGNOS*, позволяющий задавать различные сценарии динамики управляющих переменных и поправочные коэффициенты для изменения параметров;
- PROGNOSPT*, который в отличие от PROGNOS при вычислении фондообразующих затрат, корректирует инвестиции с учетом доли капитальных вложений на расширение производства, принятой в сценарии;
- PROGNOSOPT*, являющийся вариантом PROGNOS, где интенсивность восстановления ресурсов вычисляется из условия выхода к определенному времени на магистраль;
- PROG2Y*, позволяющий проводить прогноз состояния отдельного ресурса на основе модели второго уровня по заданному сценарию в модели верхнего уровня.

С аппаратно-технической точки зрения ППП «Регион» предназначен для работы на машинах типа ЕС ЭВМ в среде ОС ЕС. Язык программирования разработанных функциональных программ – Фортран. Программы RGN и SERV написаны на языке ПЛ/1.

2.4. Концепция гибридной экспертной системы

В 1989 году в рамках развития СЭЭР предложена «Концепция гибридных экспертных систем (ЭС) на базе экологических и эколо-

го-экономических моделей». Всего для создания ЭС планировалось использовать три модели: эколого-экономическую модель первого уровня; комплекс моделей «Лес» (модель «Древостой», модель «Лесные ресурсы», модель «Лесонасаждения») [7, 26], комплекс моделей «Река» (модель динамика примеси вдоль реки и два варианта моделей динамика примеси в системе рек) [13, 23].

Было принято решение начинать разработку «с нуля», так как к тому времени все известные оболочки ЭС были в той или иной степени проблемно-ориентированы, а универсальные оболочки ЭС находились в процессе создания. Для разработки ЭС планировалось использовать язык программирования общего назначения, а не специализированные языки создания систем, основанные на знаниях и логическом выводе.

На первом этапе разработки была поставлена задача выполнить начальную фазу процесса приобретения знаний согласно методологии конструирования ЭС [30]: идентификацию и концептуализацию проблемы.

Для каждого типа модели был определен перечень задач и подзадач, проведена их унификация в соответствии со следующей структурой: входная информация – источник информации – действия системы – выходная информация. Выделены следующие задачи (включающие ряд подзадач):

- (1) сравнения вариантов развития регионов по ряду параметров;
- (2) поиск вариантов развития регионов по ряду эколого-экономических критериев;
- (3) задача прогнозирования динамики лесных ресурсов;
- (4) задача поиска оптимального режима лесопользования;
- (5) задача прогноза качества воды;
- (6) нормирование гидрохимического воздействия;
- (7) наполнение модели информацией для данной реки (бассейна рек);
- (8) интерпретация в содержательных терминах полученных результатов (состояния региона, реки, лесных ресурсов).

Информация в свою очередь была классифицирована следующим образом:

- (1) числовые данные, используемые в расчетах;

- (2) аналитическая информация (формулы, уравнения, и математические методы);
- (3) содержательная информация (количественная и качественная характеристика объектов);
- (4) описательная информация;
- (5) интерпретируемая информация;
- (6) еще неформализованная информация.

Результаты работы были оформлены в виде отчета о научноисследовательской работе и вместе с готовыми на тот момент программами ЕС ЭВМ для расчетов по трем типам моделей были переданы в Институт программных систем. Именно этот отчет и стал основным источником информации о разрабатываемой гибридной экспертной системе на базе экологических и эколого-экономических моделей. К сожалению, не удалось найти последующих работ, развивающих этот подход, поэтому можно сделать предварительный вывод, что законченных программных комплексов создано не было.

Идея применения методов искусственного интеллекта для поддержки исследований на основе комплекса моделей «Регион» оказалась плодотворной. Спустя 15 лет работы в этом направлении были продолжены, в частности, система автоматизация логических рассуждений была использована в информационной системе прогнозирования динамики лесных ресурсов, а экспертная система на базе CLIPS – при создании программного комплекса «МЭЭМ».

2.5. Опыт применения СЭЭР и общие выводы

Сценарные расчеты с использованием программного обеспечения СЭЭР проводились для Байкальского региона по модели верхнего уровня, модели второго уровня для лесных ресурсов, распространения загрязнений в реке, модель возмущений экосистемы озера Байкал и др.

Для того, чтобы показать возможности СЭЭР в области комплексного исследованию развития региона приведем в качестве примера описание сценариев для модели верхнего уровня [13]. Всего к 1990 году было просчитано более 20 сценариев, разбитых на 6 групп. Сценарии группы А отражают сложившиеся тенденции развития региона.

При их формировании предполагалось, что технологическая структура производства и интенсивность природоохранных мероприятий сохранилась на сложившемся в то время уровне (конец 1980-х годов). При этом межотраслевая структура незначительно изменялась согласно существовавшим планам развития Байкальского региона. Сценарии Группы Б предусматривают анализ возможных переходов на прогрессивные формы организации производства и технологии, ориентированные на ресурсосбережение и резкое снижение нагрузки на природную среду без существенных изменений в межотраслевой структуре и объемах выпуска продукции. Группа В ориентирована на анализ проблем наращивания темпов освоения минерально-сырьевых ресурсов и усиления роли комплекса отраслей горнорудной промышленности как отрасли специализации региона. Группа Г рассматривает развитие рекреационного комплекса региона с учетом создания системы национальных парков. Группа Д предназначена для более детального анализа локальных проблем Байкальского региона, таких как развитие сельского хозяйства в Баргузинской долине, промышленное освоение зоны БАМа в пределах региона, перепрофилирование БЦБК. Сценарии Группы Е (три сценария) основаны на решении приближенно-оптимальных задач на эколого-экономической модели при различных условиях.

Рассмотренный выше обзор программных средств, созданных в рамках системы эколого-экономических расчетов, и областей их приложения показал, что хронологически эти работы соответствовали мировому уровню, а, если учитывать комплексный междисциплинарный характер подхода, то и опережали большинство аналогичных исследований. К сожалению, политические и экономические причины не позволили в течении 1990-х годов совершить качественный скачок в дальнейшем развитии программно-информационного направления: проект по внедрению СЭЭР САРМА на практике стало невозможно осуществить в силу перехода к «рыночной» экономике (изначально предполагалось включить результаты, полученные при создании СЭЭР САРМА, в подсистему «Охрана природы» автоматизированной системы плановых расчетов), а работы по созданию гибридной экспертной системы остались только на уровне концепции.

Тем не менее математическая составляющая моделей «Регион» и методы их исследования продолжали развиваться, а, следовательно, и работы по созданию программного обеспечения для их поддержки также не останавливались. Однако разработка программного обеспечения велась уже более узким коллективом и комплексных работ с перспективой широкого внедрения в практическую деятельность создано не было.

3. NESSI — Nature-Economy Simulation SYstem

Программная система NESSI – Nature-Economy Simulation SYstem (природно-экономическая система моделирования) разрабатывалась П.И. Сафоновым в 1990-х годах [31]. NESSI предназначена для применения на компьютерах типа PC с операционной системой MS DOS с использованием языков программирования FORTRAN и C.

По сравнению с моделями, используемыми в СЭЭР, при исследованиях с применением NESSI особое внимание уделяется динамике коэффициентов матриц прямых и фондообразующих затрат при производстве и восстановлении ресурсов на основе методов структурного прогнозирования [32], а также способам формирования производственных функций.

С точки зрения программной реализации модель в NESSI является вычислительной процедурой, а блоки модели – отдельные модули, отвечающие за различные этапы вычислений (расчет правой части дифференциальных уравнений, методы интегрирования, вычисление балансовых соотношений и др.). В качестве языка описания моделей используется специальное метарасширение языка программирования Fortran-77. Разработанный для NESSI препроцессор переводит это описание блоков модели в исходный код, а соответствующие оттранслированные объекты далее собираются в одну выполняемую программу вместе с интегрированным математическим и сервисным обеспечением – модулями и библиотеками связи с базой данных, диалогового доступа для редактирования глобальных параметров, организации вычислений и взаимодействия между блоками модели. Полученная таким образом программа может использоваться непрограммирующим пользователем для проведения вычислительных экспериментов.

Рис. 5. Архитектура программной системы NESSI

- (1) подготовка сценариев, включая контекстную справочно-информационную подсистему;
- (2) проведение вычислительных экспериментов: поддерживается возможность интерактивного взаимодействия (приостановка и прерывание расчетов, отслеживание информации во время процесса вычислений, изменение параметров алгоритмов);
- (3) ввод и редактирование информации (базой данных многомерных массивов, настраиваемый диалоговый интерфейс);
- (4) визуальное отображение информации (графики, таблицы, диаграммы).

Архитектура NESSI представлена на рис. 5, на котором присутствуют ее подсистемы (выделены серым) и, обеспечивающие их функционирование, основные программные компоненты. рис. 5 был разработан автором статьи на основе анализа публикаций [31–36]. Используемая архитектура позволяет особой группе подготовленных пользователей (системным аналитикам) развивать программную систему за счет новых модельных блоков или модификации существующих. За обеспечение этих возможностей отвечает подсистема конструирования моделей. Для всех других пользователей доступны следующие функции системы:

NESSI использовалась для моделирования эколого-экономической системы СССР [33] и России [34], а также при прогнозировании

загрязнения атмосферного воздуха в Западной Германии [35]. Более подробно система NESSI, модели и сценарные расчеты описаны в диссертационной работе [36].

4. DSEEmodel 1.0 — Dynamic Socio-Ecologo-Economical model

Программный комплекс DSEEmodel 1.0 разработан для поддержки вычислений по социо-эколого-экономической модели [37, 38]. По своему типу эта модель относится к модели верхнего уровня с введением дополнительных соотношений для описания динамики инновационных индексов. Эти индексы характеризуют изменения за счет инноваций элементов матрицы прямых затрат в экономическом секторе и матрицы коэффициентов прямого воздействия отраслей экономики на компоненты природной и социальной подсистем. Еще одним отличием от классического варианта моделей «Регион» является изменение номенклатуры показателей модели: социо-эколого-экономическая система описывается набором индексов, в который для учета социальной подсистемы добавлен индекс социального развития (ИСР). ИСР включает в себя взвешенную комбинацию следующих характеристик: «здоровье», «благосостояние», «образование и культура», «социальная безопасность», «социальная активность».

Комплекс DSEEmodel 1.0 предназначен для компьютерной поддержки следующих типов расчетов:

- сценарный анализ* – поиск решения (прямого расчета системы) при задании всех входных величин;
- моделирование неопределенностей* – случайное изменение коэффициентов и входов моделей с целью исследования их на устойчивость и чувствительность;
- грубая глобальная оптимизация* – поиск магистральных решений, характерных для данной модели, как приближенных глобально оптимальных, которые можно выбирать в качестве начальных приближений для последующего итерационного уточнения;
- последовательное улучшение и приближенно-оптимальный синтез управления* – реализация итерационного улучшения приближенных решений.

Основные алгоритмы комплекса программ DSEEmodel 1.0 реализованы в рамках Т-системы с открытой архитектурой (OpenTS) на языке программирования T++. Т-система — система параллельного программирования, реализующая концепцию автоматического динамического распараллеливания программ [39]. DSEEmodel 1.0 применялся на супер-ЭВМ серии «СКИФ» Союзного государства «Россия-Белоруссия».

На базе DSEEmodel 1.0 создан еще один вариант программы, ориентированный на персональный компьютер. Для него разработан графический пользовательский интерфейс SEEGrafika [38] на основе платформы .Net. Данный вариант программы поддерживает следующие типы расчетов: прямой расчет с учетом инноваций, сценарный анализ, поиск магистрального решения, последовательное улучшение управления с использованием приближенного магистрального решения как начального приближения.

DSEEmodel 1.0 и его модификация применялись для выполнения вычислений с использованием данных по Переславскому и Байкальскому регионам. DSEEmodel является современным программным средством, с использованием которого в настоящее время осуществляется решение различных задач оптимизации. Среди этих задач особый интерес представляют задачи исследования влияния инновационных процессов в социо-эколого-экономической системе.

5. Информационная система прогнозирования динамики лесных ресурсов

Информационная система прогнозирования состояния динамики лесных ресурсов [40, 41] предназначена для решения задач автоматизации поддержки принятия решений по рациональному использованию лесных ресурсов, функционирующих на основе средств обработки пространственно-распределенной информации — геоинформационных си-

Рис. 6. Архитектура системы «лесные ресурсы»

стемах (ГИС). Архитектура системы представлена на рис. 6, который подготовлен автором статьи на основе анализа публикаций [40, 41].

В информационной системе реализованы модели «Динамики управления древостоем» (ДУД) и «Лесные ресурсы» [7, 13, 26]. Модель ДУД описывает породовозрастную структуру лесных ресурсов и предназначена для расчета временной динамики лесных ресурсов территории ранга области и лесхоза по категориям земель и группам возраста. Модель «Лесные ресурсы» является пространственно-распределенной и позволяет более детально анализировать последствия проведения рубок.

Информационная система представляет собой совокупность трех базовых подсистем: ГИС, подсистемы математического моделирования и системы автоматизации логических рассуждений (системы искусственного интеллекта). Компоненты информационной системы формируют инструментальное средство, при помощи которого возможна разработка как производных, так и отдельных информационных систем.

Подсистема искусственного интеллекта позволяет автоматизировать процесс построения математической модели природного объекта. Ее средствами осуществляется выбор из базы моделей такой математической модели, которая наиболее соответствует задаче прогнозирования и рангу исследуемого объекта. Подсистема также включает базу

знаний о структурной и параметрической идентификации моделей динамики лесных ресурсов. Например, строится матрица коэффициентов перехода площадей леса из одного состояния в другое, при этом может быть учтено проведение в лесах рубок главного пользования и рубок ухода. База знаний подсистемы написана на языке логического программирования Prolog.

Подсистема математического моделирования представлена блоком численных расчетов, базой данных и моделей. Подсистема ГИС используется для отображения результатов моделирования в картографическом виде, включая анимацию изменения во времени и в пространстве различных характеристик лесов; Информационная система прогнозирования состояния динамики лесных ресурсов применялась для Усть-Илимского района Иркутской области [42].

6. Моделирование медико-эколого-экономических систем

Для формирования и исследования различных вариантов моделей медико-эколого-экономических систем [15, 21, 22], включая модели второго уровня, разработан интеллектуальный программный комплекс «МЭЭМ» [43]. Для поддержки моделирования «МЭЭМ» использует встроенную экспертную систему, база знаний которой содержит понятия и продукционные правила, описывающие процесс поэтапного формирования и исследования моделей.

Формализация процесса моделирования осуществляется в виде двух информационно-логических описаний. Информационно-логическое описание предметной области (ЛОПО) содержит описание предметной области с точки зрения эксперта-предметника. Информационно-логическое описание объектов и методов моделирования (ЛООММ) содержит информацию о структуре моделей, принципах их построения и используемых при этом методах. Задачей «МЭЭМ» является трансформация ЛОПО в ЛООММ, т. е. формирование модели, включая определение номенклатуры показателей и численных значений параметров, и проведение сценарных расчетов. В процессе такой трансформации используются различные средства, которые разделяются на три типа: 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

Рис. 7. Архитектура «МЭЭМ»

как ПФМ позволяет задавать связь между формализованными вычислительными процедурами и неформализованными методами решения задач, основанными на знаниях и опыте специалистов.

Технология использования интеллектуального программного комплекса «МЭЭМ» включает выполнение следующих этапов:

- (1) Создание и редактирование баз знаний об исследуемом объекте и используемых при его моделировании методах.
- (2) Создание процедур формирования моделей (типовые процедуры, возникающие при формировании и исследовании математических моделей систем для конкретных классов задач).
- (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.

Архитектура «МЭЭМ» согласно [43, 44], имеет вид, представленный на рис. 7. Основные модули:

«Расчет», который выполняет основные вычисления в процессе формирования модели, он предназначен для реализации вычислительных процедур ПФМ.

«Расчет-CLIPS», осуществляющий логический вывод с использованием механизмов системы CLIPS [45]. Этот модуль вызывает вычислительные процедуры, реализованные в модуле «Расчет».

При разработке «МЭЭМ» использовались следующие свободно распространяемые программные средства: CLIPS, Protege, Twiki, Eclipse. Тестирование выполнялось на ОС семейства Windows.

Программный комплекс «МЭЭМ» применялся для построения и исследования: эколого-экономической модели Европейской и Азиатской части России [21, 46]; модели динамики заболеваемости населения города Ангарска Иркутской области [47]; модели динамики заболеваний населения г. Улан-Батор (Монголия) [48]. DSEEmodel является современным программным средством, с использованием которого в настоящее время осуществляется решение различных задач оптимизации. Среди этих задач особый интерес представляют задачи исследования влияния инновационных процессов в социо-эколого-экономической системе.

7. Программное обеспечение для моделирования компонент социо-эколого-экономической систем

В рамках разработки модельного комплекса «Регион» в конце 1980-х и начале 1990-х годов также разработаны программные системы «Воздух» (Г. А. Колокольникова, А. Л. Резницкий) и «Река» (Г. Н. Константинов, Т. В. Чемезова, В. В. Козлов, М. П. Никитин).

Программа «Река» использована для поддержки исследований на основе одноименной модели [23], которую можно отнести к частным моделям. Сценарные расчеты проведены для бассейна реки Селенга.

Подход к моделированию распространения примесей в атмосфере с применением камерной модели на основе работ [24, 25] использован при разработке гибридной геоинформационной системы [49], обеспечивающей хранение исходных данных, расчет по модели, отображение информации и комплексный анализ многовариантных расчетов. Особенностью данной гибридной ГИС является возможность создания расширяемого набора расчетных сервисов, обрабатывающих пространственно-распределенную информацию. Например, расчет выбросов от точечных объектов, расчет выбросов дорожной сети (линейные объекты), интерполяция точечных данных на ячейки (используется для расчета начального состояния) и другие сервисы. Результаты моделирования концентраций загрязнений в зависимости от выбросов от различных источников использованы для прогнозирования и оценки заболеваемости в городе Улан-Батор [46].

ТАБЛИЦА 1. Типы использованных моделей

Название программы	Уровень модели	Компонент системы:						Применение
		Экономика	Природа	(экология)	Заболееваемость	Инновации	Социум	
СЭЭР САРМА	I, II, III	+	+	-	-	-	-	Байкальский регион
ППП «Регион»	I, II	+	+	-	-	-	-	Байкальский регион
Гибридная ЭС (концепция)	I, III	+	+	-	?	-	?	
NESSI	I	+	+	-	+	-	-	СССР, Россия, Западная Германия
DSEEmodel	I	+	+	+	+	+	+	Переславский и Байкальский регион
ИС динамики лесных ресурсов	III	+	+	-	-	-	-	Иркутская область
ИПК «МЭЭМ»	I, II	+	+	+	-	-	-	Байкальский регион, г. Улан-Батор, регионы Сибири

В монографии [14] представлено большое количество сценарных расчетов для Сумской области Украины и Переславского региона. Описание используемых программных средств в данной работе не представлено.

8. Классификация программных систем

Анализ и классификация программных систем и комплексов осуществлен с разных точек зрения: проблемно-ориентированной, предметно-ориентированной и программной реализации. Всего классификация проводилась по следующим группам показателей:

- (1) компонент (подсистема) социо-эколого-экономической системы;
- (2) множество решаемых задач;
- (3) операционная система и программно-аппаратная часть;
- (4) годы разработки и/или активного использования;
- (5) источник информационного наполнения (регион применения моделей).

С предметно-ориентированной точки зрения программы сравнивались по типам поддерживаемых моделей (таблица 1) и источникам конкретных данных. Выделено пять основных подсистем социо-эколого-

ТАБЛИЦА 2. Решаемые задачи

Название программы	Задачи:					Дополнительные возможности
	Сценарные расчеты	Оптимизация	Идентификация параметров	Анализ свойств модели	Обработка знаний	
СЭЭР САРМА	+	+	-	+	-	Настройка на предметную область
ППП «Регион»	+	+	-	-	-	
Гибридная ЭС (концепция)	+	+	+	+	+	
NESSI	+	?	-	-	-	
DSEEmodel	+	+	-	+	-	Поддержка высокопроизводительных вычислений
ИС динамики лесных ресурсов	+	+	+	-	+	Использование ГИС
ИПК «МЭЭМ»	+	-	+	-	+	Поддержка на основе экспертной системы

экономической системы: экономическая, природная или экологическая, заболеваемость населения, социум и инновации. Выбранные пять подсистем на агрегированном уровне охватывают все исследованные в программах компоненты социо-эколого-экономической системы.

С проблемно-ориентированной точки зрения программное обеспечение классифицировалось по типам решаемых задач (таблица 2). Выделено пять основных типов задач, к которым относятся большинство представленных в первом разделе статьи методов создания и исследования моделей.

- (1) *Сценарные расчеты* — проведение многовариантных вычислительных экспериментов, визуальное отображение полученных результатов, использование банка сценариев.
- (2) *Оптимизация* — решение задач оптимального управления в приближенно-оптимальной форме или поиск магистральных режимов.
- (3) *Идентификация параметров* — определение численных значений параметров модели с применением различных методов (идентификация по серии экспериментов, идеализированные эксперименты, предметно-ориентированные расчетные формулы и др.)

Таблица 3. Характеристика программно-аппаратной части

Название программы	Годы	Языки программирования	Программные средства	Программно-аппаратная часть
СЭЭР САРМА	1975–1988	Fortran, ПЛ-1, ассемблер	СУБД ИНЕС	ЕС ЭВМ, ОС ЕС
ППП «Регион»	1987–1990	Fortran, ПЛ-1, ассемблер	–	ЕС ЭВМ, ОС ЕС
Гибридная ЭС (концепция)	1989	Fortran, C	?	?
NESSI	1989–2000	Fortran, C	СУБД CubeMaster	ПК, ОС MS DOS
DSEEmodel	2010–...	T++, C++	T-система	СуперЭВМ, ПК
ИС динамики лесных ресурсов	2008–2010	Java, JavaScript	Prolog, OpenMap	ПК, MS Windows
ИПК «МЭЭМ»	2010–...	C++	CLIPS, Protege	ПК, MS Windows

(4) *Анализ свойств модели* — построение множеств достижимостей управляемых систем, исследования идентифицированных моделей на устойчивость и чувствительность.

(5) *Обработка знаний* – применение методов онтологического моделирования и искусственного интеллекта для представления и обработки знаний экспертов-предметников, математиков и программистов в процессе создания и исследования моделей.

Заслуживающие внимания специфические особенности программ представлены в столбце «Дополнительные возможности».

Классификация программ с точки зрения их программной реализации представлен в таблице 3. При анализе используемых сторонних библиотек и средств учитывались только наиболее значимые отличительные инструменты.

Таким образом, анализ результатов классификации программного обеспечения для моделей «Регион» позволяет сделать следующие выводы.

(1) Сценарные расчеты поддерживаются всеми программами, оптимизация поддерживается большинством программ.

- (2) Для программного обеспечения моделей «Регион» имеется опыт применения ГИС, высокопроизводительных вычислений и искусственного интеллекта.
- (3) Основные результаты в области информационного обеспечения моделей были получены для Байкальского региона. Исследования в других регионах используют эти данные в качестве базиса с учетом временного фактора и специфической для рассматриваемой территории информации.
- (4) DSEEmodel единственная программа, в которой через модель первого уровня учитываются все основные компоненты социально-эколого-экономической системы.
- (5) СЭЭР САРМА единственная программа, в которой реализована поддержка всех трех уровней модельного комплекса «Регион».
- (6) Программы используют различные языки программирования и ориентированы на разные операционные системы, что затрудняет их совместное использование.
- (7) Большинство программ обладает компонентной архитектурой, что позволяет расширять их базовые возможности.
- (8) Большинство программ в настоящее время активно не используется.

Заключение

Аналитический обзор позволил собрать и каталогизировать информацию, относящуюся к различным программам, связанным с поддержкой исследований на основе модельного комплекса «Регион». Больше внимание по сравнению с другим программным обеспечением уделено СЭЭР САРМА, так как, во-первых, при ее реализации задача ставилась наиболее обще, и, во-вторых, она была первой комплексной работой в направлении автоматизации исследований на основе моделей «Регион».

Проведенный обзор имеет непосредственное практическое значение, так как в настоящее время актуальной является задача анализа и восстановления результатов сценарных расчетов. К сожалению, в опубликованных работах, посвященных моделям «Регион», как правило представлен только типовый набор информации с разной степенью детализации. Для восстановления большей части сценарных расчетов, а не только общих параметров и вариантов динамики отдельных показателей, опубликованной информации оказывается недостаточно. Изучение архитектуры и принципов работы программного обеспечения, включая способы хранения и обработки данных, позволило

восстановить значительную часть информации, относящуюся к сценарным расчетам (например, использованную в СЭЭР). Основным источником для восстановления данных были внутренние отчеты и бумажные распечатки процесса вычислений, которые еще остались в архивах.

Возможности существующих моделей типа «Регион» на данный момент далеко не исчерпаны. Наоборот, текущий уровень математических, информационных и интеллектуальных методов обработки информации вместе с накопленными к настоящему времени большими массивами данных, отражающих различные аспекты социо-эколого-экономических систем, определяют большой потенциал дальнейшего развития моделей типа «Регион» как с теоретической точки зрения, так и в области создания программного обеспечения.

Дальнейшее направление программных разработок видится в реализации идей, заложенных еще в СЭЭР САРМА, на новой информационно-технологической основе, включая использование методов искусственного интеллекта, поддержку распределенных вычислений и веб-ориентированный способ взаимодействия с пользователями.

Список литературы

- [1] W. Leontief, D. Ford. "Environmental repercussions and the economic system", *Review of Economics and Statistics*, **52** (1970), pp. 262–271. [↑][47](#)
- [2] В. Леонтьев, Д. Форд. «Межотраслевой анализ воздействия структуры экономики на окружающую среду», *Экономика и мат. методы*, **8:3** (1972), с. 370–399. [↑][47](#)
- [3] W. Isard, C.L. Choguill, J. Kissin, R.H. Seyfarth, R. Tatlock. *Ecologic-Economic Analysis for Regional Planning*, Free Press, NY, 1971. [↑][47](#)
- [4] М. Я. Антоновский, В. А. Литвин, М. Т. Тер-Микаэлян. «Методология построения балансовых эколого-экономических моделей», *Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем*. Т. 3, Гидрометеиздат, Л., 1980. [↑][47](#)
- [5] А. Б. Горстко. *Математическая модель экосистемы Азовского моря*, Знание, М., 1979. [↑][47](#)
- [6] К. Г. Гофман. *Экономическая оценка природных ресурсов в условиях социалистической экономики*, Наука, М., 1977. [↑][47](#)
- [7] В. И. Гурман (ред.). *Модели управления природными ресурсами*, Наука, М., 1981. [↑][47](#), ⁵⁰, ⁵¹, ⁶⁰, ⁶⁷
- [8] В. И. Денисов. *Народно-хозяйственные модели оптимального развития природных комплексов*, Наука, М., 1978. [↑][47](#)

- [9] С. В. Дубровский, А. Ф. Миронычев, С. Н. Осипов. «Экологические последствия альтернатив социально-экономического развития России в переходный период», Проблемы окружающей среды и природных ресурсов. Обзорная информация, т. 5, ВИНИТИ, 1994. ↑⁴⁷
- [10] D. L. Meadows et al. *Dynamics of growth in a finite world*, Wright Allen Press Inc., Cambridge, Mass., 1974. ↑⁴⁸
- [11] Н. Н. Моисеев. *Человек и ноосфера*, Молодая гвардия, М., 1990. ↑⁴⁸
- [12] Дж. Форрестер. *Мировая динамика*, Наука, М., 1978. ↑⁴⁸
- [13] В. И. Гурман, В. Е. Викулов, Е. В. Данилина и др. (ред.). *Эколого-экономическая стратегия развития региона: математическое моделирование и системный анализ на примере Байкальского региона*, Наука, Новосибирск, 1990. ↑^{48,50,51,60,61,67}
- [14] В. И. Гурман, Е. В. Рюмина (ред.). *Моделирование социо-эколого-экономической системы региона*, Наука, М., 2001. ↑^{48,50,71}
- [15] В. А. Батурин (ред.). *Моделирование и оценка состояния медико-эколого-экономических систем*, Наука, Новосибирск, 2005. ↑^{48,50,68}
- [16] В. А. Батурин, А. А. Лемперт, Д. Е. Урбанович. «Программная система идентификации динамических моделей», *Математическое моделирование*, 16:6 (2004), с. 110–113. ↑⁴⁹
- [17] А. Ю. Горнов. «Вычислительные технологии для решения задач оптимального управления (по материалам докторской диссертации)», *Вычислительные технологии*, 10:1 (2005), с. 132а–132. ↑⁴⁹
- [18] Л. И. Лопатников. *Экономико-математический словарь. Словарь современной экономической науки*, ред. Г. Б. Клейнер, Дело, М., 2003. ↑⁴⁹
- [19] А. К. Айламазян, В. И. Гурман и др. *Взаимодействие природы и хозяйства Байкальского региона*, Наука, Новосибирск, 1981. ↑^{50,51}
- [20] В. И. Гурман, В. А. Дыхта, Н. Ф. Кашина и др. *Эколого-экономические системы: модели, информация, эксперимент*, Наука, Новосибирск, 1987. ↑⁵⁰
- [21] В. А. Ламин, В. Ю. Малов (отв. ред.). *Азиатская часть России: моделирование экономического развития в контексте опыта истории*, Издательство СО РАН, Новосибирск, 2012. ↑^{50,68,70}
- [22] И. В. Бычков, В. А. Батурин, М. П. Дьякович и др. *Математические модели состояния общественного здоровья на примере Прибайкальского региона*, Издательство СО РАН, Новосибирск, 2014. ↑^{50,68}
- [23] Л. Ю. Дамешек, Г. Н. Константинов. «Модели водных ресурсов в системе эколого-экономических расчетов «Регион»», *Математические модели и методы управления крупномасштабными водными объектами*, Наука, Новосибирск, 1987, с. 20–36. ↑^{50,60,70}

- [24] Г. А. Колокольников. «Модель распространения загрязнений, выбрасываемых предприятием в атмосферу», *Модели и методы оценки антропогенных изменений геосистем*, Наука, Новосибирск, 1986, с. 90–96. ^{↑ 51}
- [25] А. И. Москаленко. «Осредненная модель управления динамикой атмосферных загрязнений», *Модели управления природными ресурсами*, Наука, М., 1981, с. 225–231. ^{↑ 51}
- [26] А. К. Черкашин. «Система математических моделей леса», *Планирование и прогнозирование природно-экономических систем*, Наука, Новосибирск, 1984, с. 46–57. ^{↑ 51,52,60,67}
- [27] Д. М. Скитневский. *Информационное и программное обеспечение моделей сложных систем*, Изд-во Иркут. ун-та, Иркутск, 1987. ^{↑ 52}
- [28] Н. Е. Емельянов. *Введение в СУБД ИНЕС*, Наука, М., 1988. ^{↑ 53}
- [29] *Рабочие материалы по этапу 1989 года научно-исследовательской работы «Разработка пакета прикладных программ для проведения эколого-экономических расчетов»*, Гос. регистрация № 01860061264, Вычислительный центр, ИГУ, Иркутск, 1989. ^{↑ 56}
- [30] Ф. Хейс-Рот, Д. Уотерман, Д. Ленат (ред.). *Построение экспертных систем*, Мир, М., 1987. ^{↑ 60}
- [31] P. I. Safonov. «NESSY — Nature-Economy Simulation System», *Proceedings of the International Conference on Decision Support Systems in Resource Management*, Texas A&M University, College Station, USA, 1991. ^{↑ 63,64}
- [32] П. И. Сафонов. «Алгоритм прогнозирования прямых затрат в динамической модели межотраслевого баланса», *Вопросы создания АСПР. Применение экономико-математических методов в перспективном планировании*, Сб. науч. трудов ГВЦ Госплана СССР, т. 87, 1988, с. 118–138. ^{↑ 63,64}
- [33] P. I. Safonov. «Ecology-Economy Interactions Modeling: A Study of the USSR Development», Second ISEE Meeting on "Investing in Natural Capital: A Prerequisite for Sustainability (Stockholm, August 1992). ^{↑ 64}
- [34] P. I. Safonov. «Simulation and Analysis of the FSU and Russia Ecological-Economic Development», EAERE Meeting (Dublin, June 1994). ^{↑ 64}
- [35] P. I. Safonov. «Dynamic Ecology-Economy Interactions Modeling Some Experience and Perspectives of Application in Russian and German Context», *Proceedings of the International Conference "Ecology, Society, Economy: in Pursuit of Sustainable Development"* (University of Versailles Saint-Quentin, France, May 1996). ^{↑ 64,65}
- [36] П. И. Сафонов. *Система моделирования и оптимизации развития многоотраслевой экономики с учетом эколого-экономических взаимодействий*, Диссертация по специальности 05.13.10 на соискание степени к.т.н., 1995. ^{↑ 64,65}

- [37] В.И. Гурман, Г.А. Матвеев, Е.А. Трушкова. «Социо-эколого-экономическая модель региона в параллельных вычислениях», *УБС*, **32** (2011), с. 109–130. ↑ ⁶⁵
- [38] В.И. Гурман, Е.А. Трушкова, О.В. Фесько. «Программный комплекс для сценарного анализа инновационных стратегий развития региона», *Программные системы: теория и приложения*, **3:5(14)** (2012), с. 7–22, URL: http://psta.psiras.ru/read/psta2012_5_7-22.pdf ↑ ^{65,66}
- [39] С.М. Абрамов, Г.И. Есин, И.М. Загоровский, Г.А. Матвеев, В.А. Роганов. «Принципы организации отказоустойчивых параллельных вычислений для решения вычислительных задач и задач управления в Т-Системе с открытой архитектурой (OpenTS)», *Труды Межд. конф. «Программные системы: теория и приложения»*. Т. 1 (Переславль-Залесский, октябрь 2006), Наука. Физматлит, М., с. 257–264, URL: http://skif.pereslavl.ru/psi-info/rcms-open.ts/open.ts-publications/2006-rus/1-2-06-Abramov_Esin_Matveev_Roganov_Zagorovsky_Principles_of_organization-p-257.pdf ↑ ⁶⁶
- [40] А.К. Попова. «Информационная система прогнозирования динамики лесных ресурсов», *Вестник Новосибирского государственного университета. Серия: Информационные технологии*, **6:3** (2008), с. 110–117. ↑ ^{66,67}
- [41] А.К. Попова. «Автоматизация процессов подготовки управленческих решений в лесной отрасли», *Вычислительные технологии*, **13** (2008), с. 69–77. ↑ ^{66,67}
- [42] I. N. Vladimirov, A. K. Popova. «Multilevel Modeling of the Forest Resource Dynamics», *Mathematical Modelling of Natural Phenomena*, **4:5** (2009), с. 72–88. ↑ ⁶⁸
- [43] А.И. Павлов, А.Б. Столбов. «Программный комплекс для поддержки моделирования медико-эколого-экономических систем», *Программные продукты и системы*, 2011, №1, с. 137–140. ↑ ^{68,69}
- [44] В.И. Гурман, Д.Ц. Будаева, С.Н. Насатуева, А.Б. Столбов. «Оценка параметров модели региона на основе идеализированных экспериментов», *Вестник Бурятского государственного университета*, 2014, №9(1), с. 26–34. ↑ ⁶⁹
- [45] CLIPS: A Tool for Building Expert Systems, URL: <http://clipsrules.sourceforge.net> ↑ ⁷⁰
- [46] В.А. Батурин, В.В. Воробьева, В.Ю. Малов, Б.В. Мелентьев, А.Б. Столбов. «Сценарный анализ эколого-экономического развития Азиатской части России», *Современные технологии. Системный анализ. Моделирование*, 2009, №4, с. 13–18. ↑ ⁷⁰
- [47] В.А. Батурин, Н.В. Ефимова, А.Б. Столбов, Д.Е. Урбанович. «Использование математического моделирования при идентификации экологически обусловленных заболеваний», *Бюллетень Восточно-Сибирского научного центра СО РАНХ*, 2005, №8, с. 11–15. ↑ ⁷⁰

- [48] В. А. Батурин, Н. В. Ефимова, С. Будням, А. Б. Столбов, Н. С. Малтугуева, Т. А. Елфимова. «Опыт математического моделирования загрязнения атмосферного воздуха и частоты заболеваний органов дыхания у населения Улан-Батора», *Успехи современного естествознания*, 2016, №3, с. 136–140. ↑⁷⁰
- [49] В. А. Батурин, С. Будням, Н. С. Малтугуева, Р. К. Федоров. «Оценка и моделирование загрязнения атмосферного воздуха в г. Улан-Батор», *Программные системы: теория и приложения*, 3:5(14) (2012), с. 81–91, URL: http://psta.psiras.ru/read/psta2012_5_81-91.pdf ↑⁷⁰

Рекомендовал к публикации

д.ф.-м.н. И. В. Расина

Пример ссылки на эту публикацию:

А. Б. Столбов. «Программное обеспечение комплексных исследований социо-эколого-экономических систем на основе моделей «Регион»: аналитический обзор», *Программные системы: теория и приложения*, 2017, 8:4(35), с. 47–83.

URL: http://psta.psiras.ru/read/psta2017_4_47-83.pdf

Об авторе:

Александр Борисович Столбов

Кандидат технических наук, младший научный сотрудник Института динамики систем и теории управления имени, младший научный сотрудник Института динамики систем и теории управления имени В. М. Матросова СО РАН

e-mail:

stolboff@icc.ru

Aleksander Stolbov. *Software for complex studies of social-ecological and economic systems based on Region models: an analytical review.*

ABSTRACT. The article presents a historical overview and current state in the development of software that supports the research of social ecological and economic systems based on the “Region” models. The review covers development from the mid-1970s to the present.

The analysis of publications, reports and, where it was possible, documentation was carried out. The architecture of software systems, their main features and implementation methods were considered and analyzed. To represent some aspects of software, UML diagrams are exploited. The main purposes of considered software systems are the following: calculation experiment and scenario analysis, solving optimization and normalization problems, analyzing model properties and identifying parameters. The classification and comparison of software were carried out, then conclusions are drawn and future works delineated. (*In Russian*).

Key words and phrases: software, social ecological economical systems, analytical review.

References

- [1] W. Leontief, D. Ford. “Environmental repercussions and the economic system”, *Review of Economics and Statistics*, **52** (1970), pp. 262–271.
- [2] V. Leont'yev, D. Ford. “Input-output analysis of the impact of the economic structure on the environment”, *Ekonomika i mat. metody*, **8:3** (1972), pp. 370–399 (in Russian).
- [3] W. Isard, C. L. Choguill, J. Kissin, R. H. Seyfarth, R. Tatlock. *Ecologic-Economic Analysis for Regional Planning*, Free Press, NY, 1971.
- [4] M. Ya. Antonovskiy, V. A. Litvin, M. T. Ter-Mikaelyan. “Design methodology of input-output ecological and economic models”, *Problemy ekologicheskogo monitoringa i modelirovaniya ekosistem*. V. 3, Gidrometeoizdat, L., 1980 (in Russian).
- [5] A. B. Gorstko. *Mathematical model of the ecosystem of the Azov Sea*, Znaniye, M., 1979 (in Russian).
- [6] K. G. Gofman. *Economic evaluation of natural resources in a socialist economy*, Nauka, M., 1977 (in Russian).
- [7] V. I. Gurman (red.). *Models of natural resources management*, Nauka, M., 1981 (in Russian).
- [8] V. I. Denisov. *National economic models of optimal development of natural complexes*, Nauka, M., 1978 (in Russian).
- [9] S. V. Dubrovskiy, A. F. Mironychev, S. N. Osipov. “Ecological consequences of alternatives to Russia’s socio-economic development in the transition period”, *Problemy okruzhayushchey sredy i prirodnkh resursov*. Obzornaya informatsiya, vol. **5**, VINITI, 1994 (in Russian).

- [10] D. L. Meadows et al. *Dynamics of growth in a finite world*, Wright Allen Press Inc., Cambridge, Mass., 1974.
- [11] H. H. Moiseyev. *Man and noosphere*, Molodaya gvardiya, M., 1990 (in Russian).
- [12] J. Forrester. *World Dynamics*, Wriht-Allen Press, 1971.
- [13] V. I. Gurman, V. Ye. Vikulov, Ye. V. Danilina i dr. (red.). *Ecological and economic strategy of the region development: mathematical modeling and system analysis on the example of the Baikal region*, Nauka, Novosibirsk, 1990 (in Russian).
- [14] V. I. Gurman, Ye. V. Ryumina (red.). *Modeling the socio-ecological and economic system of the region*, Nauka, M., 2001 (in Russian).
- [15] V. A. Baturin (red.). *Modeling and assessment of the state of medical-ecological-economic systems*, Nauka, Novosibirsk, 2005 (in Russian).
- [16] V. A. Baturin, A. A. Lempert, D. Ye. Urbanovich. "Program system for parametric identification of dynamic models", *Matematicheskoye modelirovaniye*, **16**:6 (2004), pp. 110–113 (in Russian).
- [17] A. Yu. Gornov. "Computational technologies for solving optimal control problems (based on the doctoral dissertation)", *Vychislitel'nyye tekhnologii*, **10**:1 (2005), pp. 132a–132 (in Russian).
- [18] Lopatnikov L. I. *Economic and mathematical dictionary. Dictionary of modern economics*, ed. G. B. Kleyner, Delo, M., 2003 (in Russian).
- [19] A. K. Aylamazyan, V. I. Gurman i dr. *Interaction of nature and economy of Baikal region*, Nauka, Novosibirsk, 1981 (in Russian).
- [20] V. I. Gurman, V. A. Dykhta, N. F. Kashina i dr. *Ecological and economic systems: models, information, experiment*, Nauka, Novosibirsk, 1987 (in Russian).
- [21] V. A. Lamin, V. Yu. Malov (otv. red.). *Asian part of Russia: modeling of economic development in the context of experience of history*, Izdatel'stvo SO RAN, Novosibirsk, 2012 (in Russian).
- [22] I. V. Bychkov, V. A. Baturin, M. P. D'yakovich i dr. *Mathematical models of the state of public health in the example of the Baikal region*, Izdatel'stvo SO RAN, Novosibirsk, 2014 (in Russian).
- [23] L. Yu. Dameshek, G. N. Konstantinov. "Models of water resources in the system of ecological and economic calculations "Region"", *Matematicheskiye modeli i metody upravleniya krupnomasshtabnymi vodnymi ob'yektami*, Nauka, Novosibirsk, 1987, pp. 20–36 (in Russian).
- [24] G. A. Kolokol'nikova. "The model for the pollutants spreading emitted by an enterprise into the atmosphere", *Modeli i metody otsenki antropogennykh izmeneniy geosistem*, Nauka, Novosibirsk, 1986, pp. 90–96 (in Russian).
- [25] A. I. Moskalenko. "The averaged model for controlling the dynamics of atmospheric pollution", *Modeli upravleniya prirodnymi resursami*, Nauka, M., 1981, pp. 225–231 (in Russian).
- [26] A. K. Cherkashin. "System of mathematical models of forest", *Planirovaniye i prognozirovaniye prirodno-ekonomicheskikh sistem*, Nauka, Novosibirsk, 1984, pp. 46–57 (in Russian).
- [27] D. M. Skitnevskiy. *Information and software for models of complex systems*, Izd-vo Irkut. un-ta, Irkut-sk, 1987 (in Russian).

- [28] N. Ye. Yemel'yanov. *Introduction to DBMS INES*, Nauka, M., 1988 (in Russian).
- [29] [29] *Working materials on the 1989 stage of research work "Development of a package of applied programs for environmental and economic calculations*, Gos. registratsiya no. 01860061264, Vychislitel'nyy tsentr, IGU, Irkut-sk, 1989 (in Russian).
- [30] F. Kheys-Rot, D. Uoterman, D. Lenat (red.). *Postroyeniye ekspertnykh sistem*, Mir, M., 1987 (in Russian).
- [31] P. I. Safonov. "NESSY — Nature-Economy Simulation System", *Proceedings of the International Conference on Decision Support Systems in Resource Management*, Texas A&M University, College Station, USA, 1991.
- [32] P. I. Safonov. "Algorithm for forecasting direct costs in the input-output dynamic model", *Voprosy sozdaniya ASPR. Primeneniye ekonomiko-matematicheskikh metodov v perspektivnom planirovanii*, Sb. nauch. trudov GVTs Gosplana SSSR, vol. **87**, 1988, pp. 118–138 (in Russian).
- [33] P. I. Safonov. "Ecology-Economy Interactions Modeling: A Study of the USSR Development", Second ISEE Meeting on "Investing in Natural Capital: A Prerequisite for Sustainability (Stockholm, August 1992).
- [34] P. I. Safonov. "Simulation and Analysis of the FSU and Russia Ecological-Economic Development", EAERE Meeting (Dublin, June 1994).
- [35] P. I. Safonov. "Dynamic Ecology-Economy Interactions Modeling Some Experience and Perspectives of Application in Russian and German Context", *Proceedings of the International Conference "Ecology, Society, Economy: in Pursuit of Sustainable Development"* (University of Versailles Saint-Quentin, France, May 1996).
- [36] P. I. Safonov. *System for modeling and optimizing the development of a diversified economy, taking into account environmental and economic interactions*, Dissertatsiya po spetsial'nosti 05.13.10 na soiskaniye stepeni k.t.n., 1995 (in Russian).
- [37] V. I. Gurman, G. A. Matveyev, Ye. A. Trushkova. "Socio-ecological-economic region model in parallel computing", *UBS*, **32** (2011), pp. 109–130 (in Russian).
- [38] V. I. Gurman, Ye. A. Trushkova, O. V. Fes'ko. "Software package for optimization of regional development strategy in respect of innovations", *Program Systems: Theory and Applications*, **3:5(14)** (2012), pp. 7–22 (in Russian), URL: http://psta.psiras.ru/read/psta2012_5_7-22.pdf
- [39] S. M. Abramov, G. I. Esin, I. M. Zagorovskiy, G. A. Matveyev, V. A. Roganov. "Principles of organization of the failure tolerance parallel computations for the computational and control tasks in the T-system with the open architecture (OpenTS)", *Trudy Mezhd. konf. "Programmnyye sistemy: teoriya i prilozheniya"*. V. 1 (Pereslavl'-Zalesskiy, oktyabr' 2006), Nauka. Fizmatlit, M., pp. 257–264 (in Russian), URL: http://skif.pereslavl.ru/psi-info/rcms-open.ts/open.ts-publications/2006-rus/1-2-06-Abramov_Esin_Matveev_Roganov_Zagorovsky_Principles_of_organization-p-257.pdf
- [40] A. K. Popova. "Information system for forecasting the dynamics of forest resources",

- Vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Informatsionnyye tekhnologii*, **6:3** (2008), pp. 110–117 (in Russian).
- [41] A. K. Popova. “Automation of processes for preparing of decision-making in the forestry sector”, *Vychislitel’nyye tekhnologii*, **13** (2008), pp. 69–77 (in Russian).
- [42] I. N. Vladimirov, A. K. Popova. “Multilevel Modeling of the Forest Resource Dynamics”, *Mathematical Modelling of Natural Phenomena*, **4:5** (2009), pp. 72–88.
- [43] A. I. Pavlov, A. B. Stolbov. “Software for support of modeling of medical ecological economical systems”, *Programmy nye produkty i sistemy*, 2011, no.1, pp. 137–140 (in Russian).
- [44] V. I. Gurman, D. Ts. Budayeva, S. N. Nasatuyeva, A. B. Stolbov. “Estimation of model parameters of a region based on idealized experiments”, *Vestnik Buryatskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2014, no.9(1), pp. 26–34 (in Russian).
- [45] *CLIPS: A Tool for Building Expert Systems*, URL: <http://clipsrules.sourceforge.net>
- [46] V. A. Baturin, V. V. Vorob’yeva, V. Yu. Malov, B. V. Melent’yev, A. B. Stolbov. “Scenario analysis of the ecological and economic development of the Asian part of Russia”, *Sovremennyye tekhnologii. Sistemnyy analiz. Modelirovaniye*, 2009, no.4, pp. 13–18 (in Russian).
- [47] V. A. Baturin, N. V. Yefimova, A. B. Stolbov, D. Ye. Urbanovich. “The use of mathematical modeling in the identification of environmentally-related diseases”, *Byulleten’ Vostochno-Sibirskogo nauchnogo tsentra SO RAMN*, 2005, no.8, pp. 11–15 (in Russian).
- [48] V. A. Baturin, N. V. Yefimova, S. Budnyam, A. B. Stolbov, N. S. Maltuguyeva, T. A. Yelfimova. “Experience in mathematical modeling of atmospheric air pollution and frequency of respiratory diseases among the population of Ulan-Bator”, *Uspekhi sovremennogo yestestvoznaniya*, 2016, no.3, pp. 136–140 (in Russian).
- [49] V. A. Baturin, S. Budnyam, N. S. Maltuguyeva, R. K. Fedorov. “Evaluation and modeling of air pollution in Ulaanbaatar”, *Program Systems: Theory and Applications*, **3:5(14)** (2012), pp. 81–91 (in Russian), URL: http://psta.psir.ru/read/psta2012_5_81-91.pdf

Sample citation of this publication:

Aleksander Stolbov. “Software for complex studies of social-ecological and economic systems based on Region models: an analytical review”, *Program systems: Theory and applications*, 2017, **8:4(35)**, pp. 47–83. (In Russian).

URL: http://psta.psir.ru/read/psta2017_4_47-83.pdf