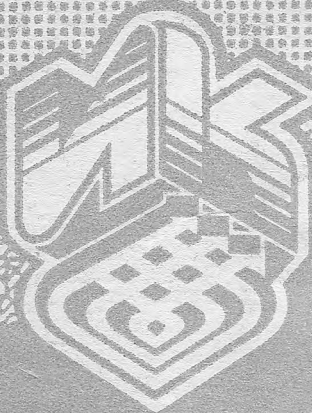


577.4
К 637



**КОМПЬЮТЕРНЫЕ СИСТЕМЫ
ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ
РЕШЕНИЙ В ЭКОЛОГИИ**

577.4 644.26

К637 Толмачевские
системы под-
делки документов
в архивах
Киев, 1981. 1-05

644.26

Академия наук Украинской ССР
Ордена Ленина Институт кибернетики имени В.М.Глушкова
Научный совет АН УССР по проблеме "Кибернетика"

КОМПЬЮТЕРНЫЕ СИСТЕМЫ ПОДДЕРЖКИ
ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ В ЭКОЛОГИИ

Сборник научных трудов

Киев 1991

577.4
К 637

УДК 519:681:574

Компьютерные системы поддержки принятия решений в экологии:
Сб. науч. тр. /АН УССР. Ин-т кибернетики им. В.М.Глушкова,
Науч. совет АН УССР по пробл. "Кибернетика"; Редкол.: Морозов
А.А. (отв. ред.) и др. - Киев, 1991. - 77 с.

В сборнике представлены результаты исследования проблем, связанных с ликвидацией последствий аварии на Чернобыльской АЭС. Предложена концепция построения республиканской экологической системы поддержки принятия решений. Рассмотрены вопросы моделирования миграции загрязняющих веществ в речных системах и с поверхностным стоком. Описаны системы автоматизации картографирования, поддержки принятия решений в экологии и сельском хозяйстве.

Для специалистов различных профилей, применяющих математические методы для решения экологических проблем.

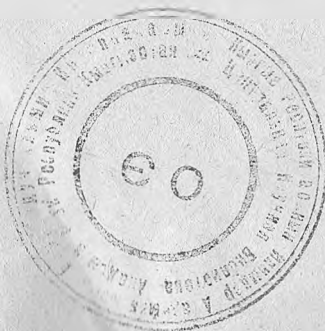
Редакционная коллегия

чл.-кор. АН УССР А.А. Морозов (ответственный редактор),
кандидаты физико-математических наук М.И. Железняк, С.В.
Пашко (ответственный секретарь), В.С. Чабанюк, Н.Д. Чепурной,
Н.Н. Бука

Рецензент канд. техн. наук Б.Г.Мудля

Утверждено к печати научным советом АН УССР по проблеме
"Кибернетика"

ISBN 5-7702-0256-4 © Институт кибернетики имени В.М. Глушкова
АН УССР, 1991



644426

Введение. В сборнике отражены основные итоги работы семинара Научного совета АН УССР по проблеме "Кибернетика" "Системный анализ и методы математического моделирования в экологии" в 1990-1991 гг. Он является логическим продолжением и развитием сборника "Системный анализ и методы математического моделирования в экологии". Вниманию читателей предлагается как общая концепция построения республиканской СППР в экологии, так и работы, касающиеся отдельных ее подсистем. Основное внимание уделяется программным системам, реализующим математические модели физических процессов переноса загрязнителей в различных средах. Представляет интерес работа по применению игрового подхода в экологии, которая может стать одним из основных блоков системы поддержки принятия решений.

Включение в сборник работы по сельскохозяйственной тематике объясняется предполагаемым сближением задач экологии и сельского хозяйства на локальном уровне. Представляется, что объединяющим началом здесь может послужить концепция геоинформационной системы (ГИС). В сборнике предложена работа по технологии обработки геоизображений, что имеет большое значение при построении ГИС. Результаты, изложенные в предыдущем и настоящем сборниках, свидетельствуют о том, что разработанные системы могут естественным образом включаться в качестве подсистем в различные системы поддержки принятия решений в экологии локального, регионального и национального уровней.

УДК 502.3:519.7:519.68

Н.Д.Чепурной, Н.Н.Сука, В.С.Чабанюк

**ОБ ОДНОЙ ОБЩЕЙ КОНЦЕПЦИИ ПОСТРОЕНИЯ РЕСПУБЛИКАНСКОЙ
ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ**

С использованием структуралистского подхода общей теории систем получена общая концепция построения республиканской системы поддержки принятия решений в экологии (РЭСППР). Указаны типы системного мониторинга РЭСППР, выделены вертикальные, горизонтальные и территориальные уровни системы. Приведены функциональная, проблемно-ориентированная и техническая схемы РЭСППР.

ISBN 5-7702-0256-4 Компьютерные системы поддержки принятия решений в экологии. Киев, 1991.

В работе [1] показано, что одной из актуальнейших проблем фундаментальной и прикладной науки является создание многоуровневых систем поддержки принятия решений (СППР) в современных эколого-экономических системах (ЭЭС). При этом были отмечены следующие общие положения, характерные для современных ЭЭС:

1) усиление, углубление и расширение внутренних, горизонтальных и вертикальных связей;

2) резкое обострение экологических проблем на локальном, региональном и глобальном (национальном) уровнях;

3) в блоке человеческой деятельности ЭЭС отсутствуют системы качественного информационного обслуживания и принятия решений, обеспечивающие обоснованное принятие решений с точки зрения гарантированного устойчивого долгосрочного рационального развития ЭЭС локального, регионального и глобального уровней.

Согласно предложенному в [1] подходу, СППР обеспечивает гарантированное устойчивое долгосрочное развитие некоторой ЭЭС, если одновременно достигаются экономические и экологические критерии. В качестве экономического критерия выступало обязательное удовлетворение постоянно растущего спроса на потребление товаров, а экологического - стремление экологической системы к сохранению гомеостазиса, границы которого можно задать, введя совокупность критериев качества экосферы.

Рассмотрим самую общую концепцию построения республиканской экологической СППР (РЭСПР), цель которой - обеспечение экологического критерия. Термин СППР мы понимаем шире, чем это принято в системном анализе. Именно, РЭСПР понимается как целенаправленная система, а еще точнее - как многоцелевая направленная система [2]. Она должна обеспечивать:

- сбор и хранение информации об экологической обстановке на территории Украины;

- оперативное и надежное установление фактов аварий на потенциальных источниках техногенного загрязнения;

- поддержку принятия решений по составлению плана соответствующих мероприятий в случае аварий, по снижению последствий аварий;

- выявление и оценку характера, масштабов и последствий загрязнения территории республики вследствие аномальных изме-

мений экологической обстановки;

- прогнозирование изменения загрязнения территории вследствие природных явлений и техногенных факторов;

- поддержку принятия стратегических решений, учитывающих взаимодействие экологического и экономического блоков.

Критерии качества ЭСФ (условно) можно разделить на дифференциальные и интегральные. К дифференциальным критериям относятся предельно допустимые концентрации (ПДК), предельно допустимые нагрузки (ПДН) и т.п. К интегральным критериям можно отнести, например, биоиндикаторы.

Необходимо отметить, что на Украине и в СССР начаты работы по кардинальному изменению положения З). В частности, в СКБ ММС Института кибернетики имени В.М. Глушкова АН УССР в последние годы проводились интенсивные работы по концептуальному и логическому проектированию Республиканской эколого-информационной системы (РЭИС) как подсистемы Государственной ЭИС (ГЭИС), республиканской автоматизированной системы контроля радиационной обстановки (РАСКРО "Украина") как подсистемы Единой государственной АСКРО (ЕГАСКРО) и РЭИС, системы экологического мониторинга (СЭМ) Украины. В рамках "Государственной программы неотложных мероприятий по ликвидации последствий аварии на ЧАЭС на 1990-1992 гг." подготовлен проект создания единой Республиканской информационно-аналитической системы (РИАС) УССР, ориентированной на поддержку принятия решений при ликвидации последствий аварии на ЧАЭС.

Сформированы предложения в проект Государственной программы охраны окружающей среды и рационального использования природных ресурсов Украинской ССР на 1991-1995 годы и на период до 2005 года по разделу "Разработка и внедрение системного мониторинга окружающей среды и республиканской экологической информационной системы".

Укажем сразу наше понимание иерархии упомянутых систем, которым ниже дадим определение. На языке теории множеств справедливы следующие соотношения:

СЭМ РЭИС, РАСКРО РЭИС, СЭМ РАСКРО=0,

РЭИС РЭИМС РЭИАС РЭСИПР РСИПР ЭЭС.

Здесь РЭИМС - республиканская экологическая информационно-моделирующая система, РЭИАС - республиканская экологическая информационно-аналитическая система, РСИПР ЭЭС - республиканская СИПР ЭЭС.

РЭСИПР следует рассматривать как средство эмпирического исследования окружающей среды (в том числе и человека), позволяющее не только фиксировать ее состояние, но и осуществлять положительное воздействие на ее качество (т.е. РЭСИПР - обязательно система с обратной связью).

Для любого содержательного эмпирического исследования необходимы три предпосылки. Должны быть определены: во-первых, объект исследования; во-вторых, цель исследования этого объекта; в-третьих, ограничения, при которых проводится исследование.

Объект исследования (определяется как часть мира, различаемая как единое целое в течение достаточно длительного периода времени и подходящая для какого-либо конкретного исследования) - ЭСФ.

Цель исследования (можно представить как набор вопросов об объекте, на которые исследователь или его заказчик хотят получить ответы) - сохранение гомеостазиса ЭСФ, границы которого задаются вводом дифференциальных и интегральных критериев ее качества.

Ограничения представляют собой ограниченные возможности выбора инструментов, ограниченные финансовые возможности и время, людские ресурсы и мощность вычислительной техники, правовые, моральные и другие нормы, которых должен придерживаться исследователь. Остановимся на ограничениях, обусловливаемых функциональными подсистемами РЭСИПР, - так называемых функциональных ограничениях. К функциональным подсистемам РЭСИПР следует отнести подсистемы:

- базового экологического мониторинга (ЭМ) (систематический процесс наблюдения, сбора и передачи информации о состоянии ЭСФ, предоставляемой с целью оценки, анализа, прогноза и управления ее качеством) (включающего подсистему фонового ЭМ);
- инспекционного ЭМ;
- кризисного ЭМ (частично включающего подсистему импактного (объектного) ЭМ);
- геоинформационного мониторинга (ГИМ) (обеспечивающего геоинформационную систему (ГИС));
- научно-исследовательского мониторинга (НИМ);
- нормативно-справочного мониторинга (НСМ);
- банков данных и первичной графической и статистической

обработки информации:

- прогнозирования состояний ЭСФ и моделирования чрезвычайных экологических ситуаций (ЧЭС);
- поддержки принятия неотложных и стратегических решений.

При разработке РЭСШР необходимо выдерживать следующие общие принципиальные положения.

1. РЭСШР - единая всеведомственная система сбора, накопления, обработки и анализа информации об экологической обстановке на Украине.

РЭСШР должна обеспечить своевременность получения, полноту, достоверность и совместимость информации, что является необходимым условием для качественного принятия решений.

2. РЭСШР - интегрированная система. Она должна включать систему поддержки принятия неотложных решений (СПНР), рассматриваемую как систему, принимающую решения и обеспечивающую сохранение дифференциальных критериев, и систему поддержки принятия стратегических решений (СПСР) - регулятор, обеспечивающий сохранение интегральных критериев качества ЭСФ:

РЭСШР=СПНР СПСР.

3. РЭСШР должна обеспечить информационную и аналитическую поддержку на всех уровнях принятия решений: республика, регион, область, район, населенный пункт.

4. В рамках разработки РЭСШР центральным направлением должно стать создание сквозной информационной технологии, обеспечивающей максимальную автоматизацию этапов сбора, накопления, обработки и анализа информации, поступающей от стационарных, мобильных, научно-исследовательских центров и центров получения нормативно-справочной информации. При этом основу системы должны составлять подсистемы мониторинга территории и мониторинга источников и информационно-аналитические центры (ИАЦ). Каждый из ИАЦ представляет собой сложные комплексы, обеспечивающие реализацию на определенной территории тех же функций, что и вся РЭСШР на территории Украины. В связи с этим выдвигается принцип типовой территориальной ЭСПР. Информационно-техническая схема такой ЭСПР включает подсистемы:

- первичных измерений;
- передачи данных первичных измерений;
- сбора данных по сети первичных измерений;
- накопления и предварительной обработки данных первич-

- ных измерений;
- связи с другими центрами;
- анализа данных мониторинга и поддержки принятия решений.

5. При проектировании и создании РЭСИПР должен быть учтен зарубежный опыт с ориентацией на лучшие достижения в области новых информационных технологий. Это должно касаться как самих систем сбора, передачи и накопления данных, так и вычислительных комплексов по обработке, анализу, моделированию и принятию решений.

6. Конкретные предложения по структуре, составу и функциям РЭСИПР должны учитывать сложившуюся ситуацию в СССР в области экологии, исключать распыление средств, выделяемых в рамках различных природоохранных программ на создание автоматизированных систем сбора и обработки экологической информации.

7. В проекте РЭСИПР следует выделять три уровня разработки: архитектура, исполнение и реализация. Архитектура РЭСИПР - это функциональное проявление системы с точки зрения пользователя (концептуальное проектирование); под исполнением понимается логическое описание внутренней структуры, делающей возможным осуществление этих функций (логическое проектирование или проектирование реализации); реализация - это физическое воплощение исполнения (физическое проектирование).

В архитектуре РЭСИПР необходимо выделять следующие общепринятые принципы [2]:

1) Согласованность. Частичное знание системы позволяет предсказать остальное.

2) Ортогональность. Функции должны быть независимы друг от друга и специфицированы по отдельности.

3) Соответственность. В архитектуре РЭСИПР не должно быть ненужных функций.

4) Экономичность. Никакая функция в описании архитектуры не должна в том или ином виде дублировать другую.

5) Прозрачность. Функции, найденные в процессе исполнения, должны быть известны пользователю.

6) Общность. Если функция должна быть введена, ее следует вводить в таком виде, чтобы она отвечала как можно большему числу назначений.

7) Открытость. Пользователю должно быть позволено использовать функцию иначе, чем это предлагалось при проектировании.

8) Полнота.

8. Концептуальное и логическое проектирование должно проводиться сверху-вниз (республика - регион (область) - район - населенный пункт (объект)); физическое - снизу-вверх.

В РЭСИПР следует выделить такие ключевые аспекты:

- мониторинг ЭСФ;
- информационная поддержка (как мониторинга, так и принятия решений);
- принятие решений.

Разработанная концепция РЭСИПР позволяет выделить следующие укрупненные структурные (иерархические, вертикальные) уровни системы:

1. Первичных наблюдений (измерений) и сбора информации по сети первичных наблюдений. Ключевой аспект - описание каналов наблюдений как в смысле измерительных устройств, так и в смысле процедур измерения.

2. Передачи данных от систем сбора первичной информации в ИАЦ обработки информации, а также информационного обмена между центрами. Ключевой аспект - математический формализм для описания системы передачи.

3. Нулевого порождения. Ключевой аспект - интегрированные банки данных, в том числе и на распределенных носителях информации.

4. Первичного порождения. Ключевой аспект - функции первичной графической и статистической обработки, обнаружение с заданной вероятностью и за заданный промежуток времени фактов превышения заданных критических значений. Научное обоснование предельно допустимых концентраций и нагрузок. Поддержка принятия неотложных решений. Реализация обратной связи.

5. Вторичного порождения. Ключевой аспект - максимально математически формализуемые модели миграции загрязнителей в различных природных средах и методы оценки состояния окружающей среды. Моделирование чрезвычайных ситуаций, прогнозирование ухудшения состояния ЭСФ. Поддержка принятия неотложных и стратегических решений.

6. Третичного порождения. Ключевой аспект - экспертная система, в первую очередь оценки качества ЭСФ. Интегральная

оценки качества ЭСФ. Поддержка принятия стратегических решений.

7. Принятия решений. Ключевой аспект - поддержка принятия стратегических решений, в том числе с учетом взаимодействия экологического и экономического блоков. Реализация обратной связи.

Уровни 1-7 имеют место для всех территориальных уровней - локального, регионального, республиканского.

Кроме того, на объектном уровне имеют место уровни 1-3, а иногда и 1-4.

Помимо территориального и вертикального структурирования системы следует выделить и горизонтальное структурирование системы, которое справедливо для всех (кроме, возможно, объектного) территориальных уровней. Горизонтальное структурирование системы на всех территориальных уровнях вызвано следующими типами мониторинга: 1) ЭМ (кризисным, базовым, инспекционным); 2) ГИМ; 3) НИМ; 4) НСМ.

Мониторинги 2)-4) должны иметь экологическую направленность. Вертикальные уровни 1 и 2 на всех территориальных уровнях следует рассматривать, как обеспечивающие 4 указанных типа мониторинга - собственно мониторинг. Их называют каналами наблюдения (КН).

Вертикальные уровни 3-6 обеспечивают информационную поддержку как мониторинга, так и принятия решений для всех территориальных уровней. Они являются структурными элементами СИПНР и СИПСР.

Через уровень 4 осуществляется обратная связь СИПНР, а через уровень 7 - регулирование СИПСР.

При рассмотрении различных аспектов создания РЭСИПР следует особо выделить следующие:

1) проектирование (концептуальное и логическое) всей системы должно выполняться с использованием одного из формализмов системного анализа и обязательным привлечением общеизвестных методов проектирования систем;

2) РЭСИПР должна обеспечить вневедомственное принятие решений;

3) необходим научный прогноз развития средств вычислительной техники с целью использования на региональных, республиканских и союзном уровнях.

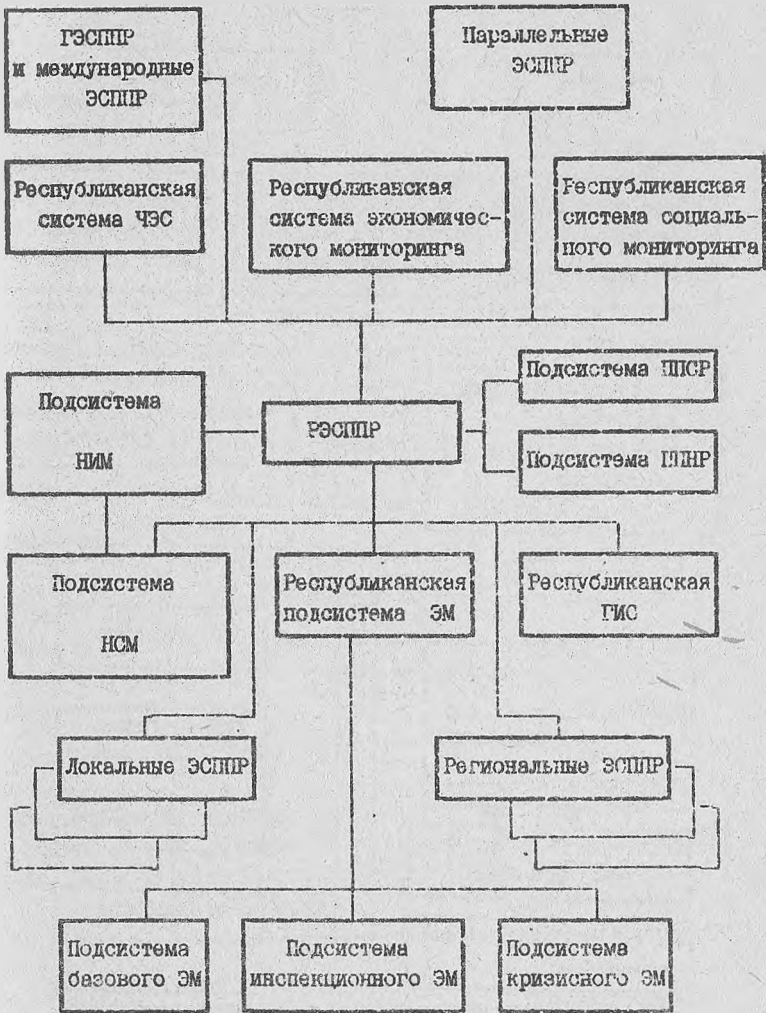


Рис. 1. Общая функциональная схема РЭСНР

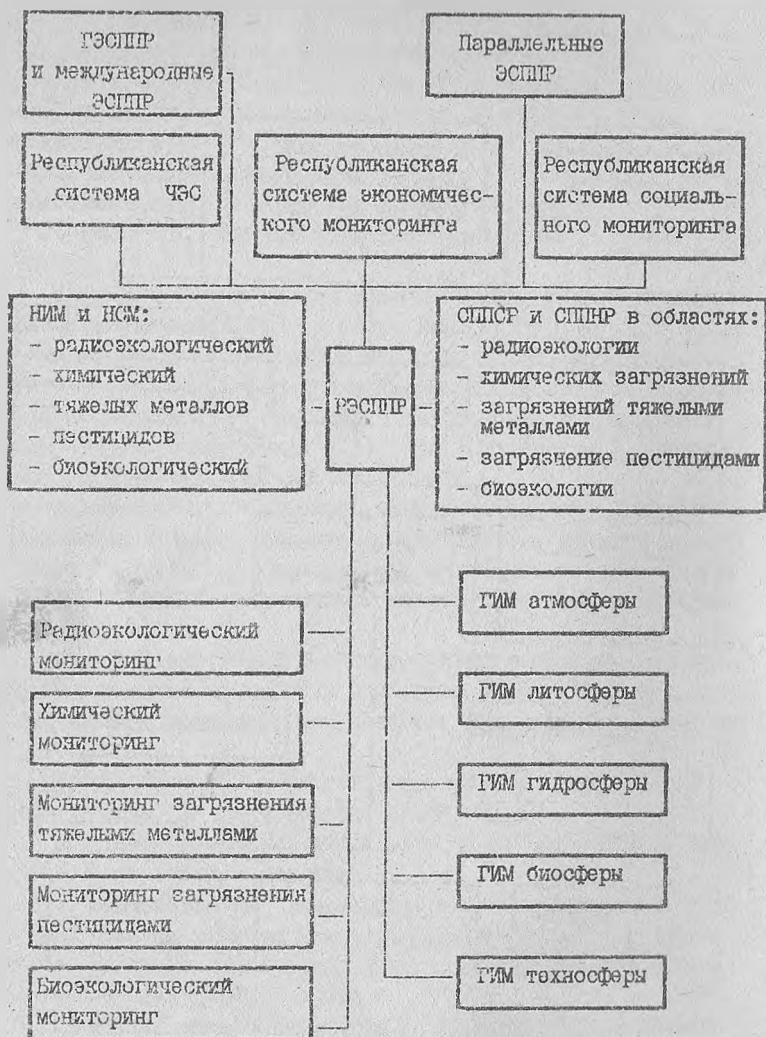


Рис. 2. Проблемно-ориентированная схема РЭСЭПР

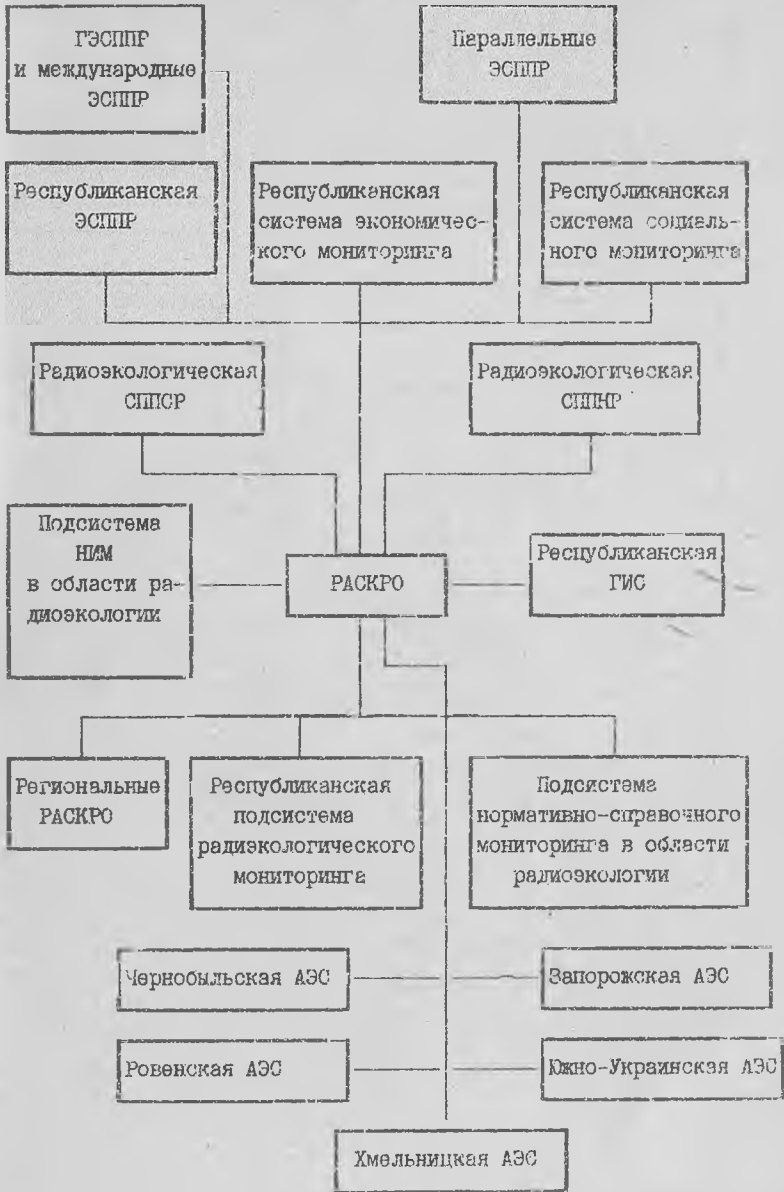


Рис. 3. РАСКРО "Украина"

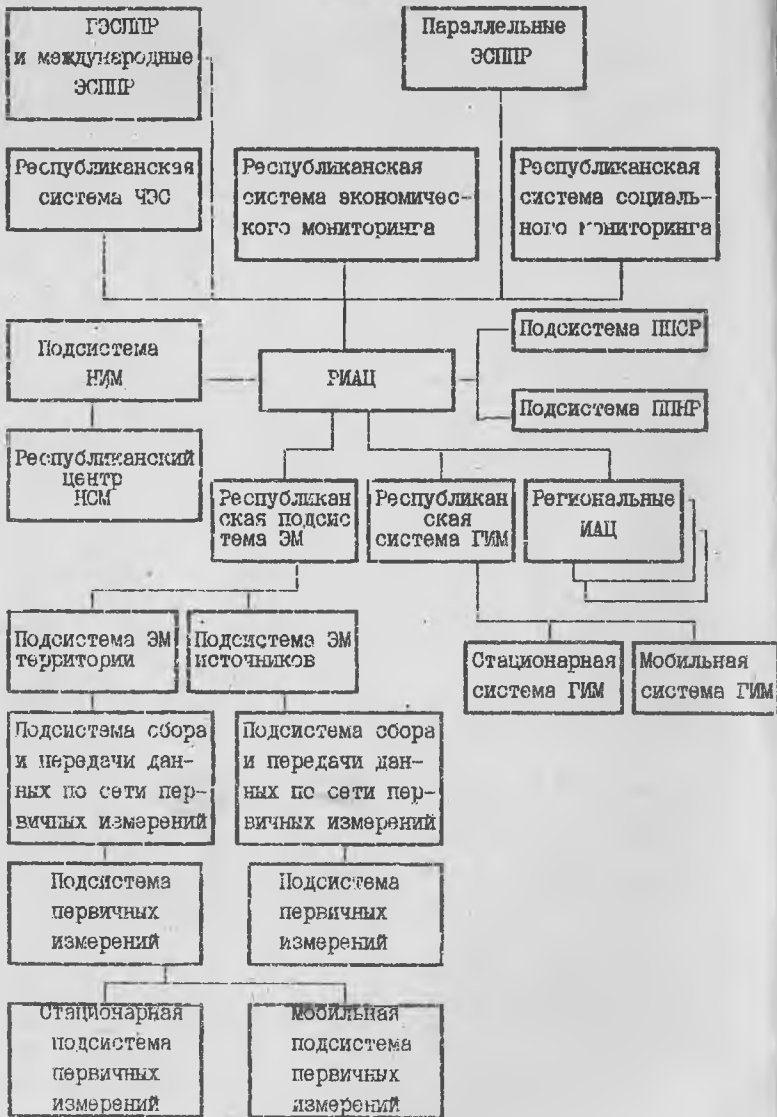


Рис. 4. Техническая схема РИАЦ

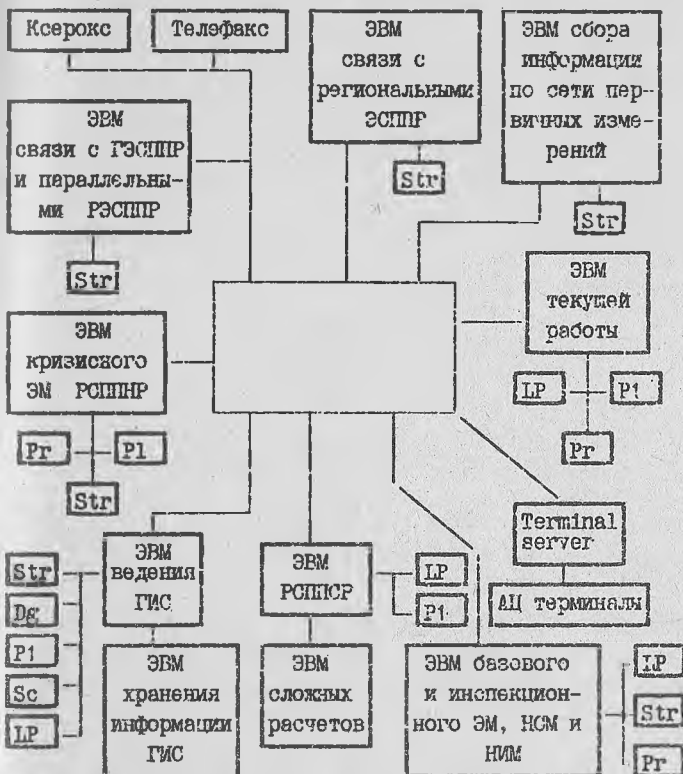


Рис. 5. Техническая схема РМАЦ: Str - стример;
 Dg - дигитайзер; Pl - плоттер; Sc - сканер;
 Pr - принтер; LP - лазерный принтер

Самый важный для Украины вывст. заключается в приоритетном развитии подсистемы базового мониторинга, который в ближайшие годы может проводиться на существующей измерительной технике и сетях передачи данных, что, в свою очередь, влечет приоритетное развитие структурных уровней 3)-7), а также геоинформационной системы с целью как можно более быстрого выхода на эффективное научно обоснованное принятие решений в области экологии.

На всех территориальных уровнях вертикальные уровни 1-3 составляют СЭМ, 1-4 - РЭИС, 1-5 - РЭИМС, 1-6 - РЭИАС, 1-7 - РЭСИПР.

Чтобы проиллюстрировать предложенное структурирование РЭСИПР, приведем функциональную, проблемно-ориентированную и техническую схемы РЭСИПР (см. рис. 1-5).

Результаты строгого концептуального проектирования республиканской радиоэкологической СИПР авторы радиологают изложить в серии статей, отражающих последовательный подъем по уровням знания о системе:

- 1) нулевого порождения данных;
- 2) первичного порождения информации;
- 3) вторичного порождения информации;
- 4) третичного порождения информации;
- 5) принятия решений.

Необходима также работа по формализованному описанию каналов наблюдения.

Привлекательный формализм системного анализа допускает рассмотрение радиоэкологической СИПР как структурной подсистемы РЭСИПР, причем он может применяться для концептуального проектирования всей системы.

С п и с о к л и т е р а т у р ы

1. Морозов А.А., Чепурной Н.Д. Проблемы создания многоуровневых систем поддержки принятия решений в современных эколого-экономических системах // Системный анализ и методы математического моделирования в экологии. - Киев: Ин-т кибернетики им. В.М.Глушкова АН УССР, 1990. - С. 4-15.

2. Клиф Дж. Системология. Автоматизация решения системных задач. - М.: Радио и связь, 1990. - 544 с.

Получено 14.06.91

УДК 517.9

В.П.Малюков, Н.В.Линдер

ИГРОВОЙ ПОДХОД В ЭКОЛОГО-ЭКОНОМИЧЕСКОМ МОДЕЛИРОВАНИИ

Предлагается математическая модель эколого-экономического взаимодействия двух регионов. Разработан численный алгоритм реализации оптимальной стратегии и приведены тестовые примеры, иллюстрирующие поведение сторон при заданном наборе исходных данных.

В настоящее время вопросы математического моделирования экологического состояния окружающей среды приобретают большое значение. Поэтому, немаловажную роль имеют попытки разработать и исследовать математическую модель, в которой была бы учтена взаимосвязь таких основных характеристик деятельности людей, как экономика и экология. При таком моделировании возникает необходимость использовать инструментарий теории игр, так как конфликтность, требующая своего разрешения методами теории игр, возникает как на межрегиональном, так и на региональном уровнях, например, при решении вопроса, как развивать экономику без ущерба для экологии и наоборот. Приведем модель эколого-экономического взаимодействия двух регионов.

Постановка задачи. Имеются два региона, экономические системы которых функционируют в дискретные моменты времени $t=0,1,\dots$ и моделируются моделями экономической динамики m_1 и m_2 наймановского типа [1]. Каждая такая модель определяется замкнутым выпуклым конусом

$$Z_t \subset R_+^{2n} : Z_t = \{ (x,y) : (x,y) \in R_+^{2n}, y \leq B_t x \}.$$

где $B_t (t=1,2)$ - матрицы n порядка с положительными элементами, называемые матрицами выпуска моделей; пара (x,y) называется технологическим процессом модели экономической динамики: x - вектором затрат, y - вектором выпуска, x_t, y_t характеризуют количество продуктов i -го наименования. Напомним экономическую интерпретацию пары $(x,y) \in Z_t$. Экономика m_t , имея в начале планового периода t набор продуктов в количестве x перерабатывает его в течение планового периода $[t, t+1]$ в набор продуктов в количестве y . Опишем, как происходит взаимодействие регионов.

Первый регион, экономика которого m_1 , имеет в момент времени $t=0$ состояние $x_1(0)$, действует следующим образом:

ISBN 5-7702-0256-4 Компьютерные системы поддержки принятия решений в экологии. Киев, 1991.



644126

$$x_1(0) \rightarrow V_1 x_1(0) \begin{cases} (E - U_1(0)) B_1 x_1(0); \\ \Delta_1 U_1(0) B_1 x_1(0); \\ (E - \Delta_1) U_1(0) B_1 x_1(0); \end{cases}$$

т.е. из состояния $x_1(0)$ он получает в результате реализации технологического процесса $(x_1(0), V_1 x_1(0))$ величину продукта в количестве $V_1 x_1(0)$, который из соображений защиты экологии распределяет на три части: $\Delta_1 U_1(0) B_1 x_1(0)$ - часть, идущую на развитие экологически чистых производств в первом регионе; $(E - \Delta_1) U_1(0) B_1 x_1(0)$ - часть, идущую непосредственно на охрану окружающей среды первого региона, и $(E - U_1(0)) B_1 x_1(0)$ - часть, идущую на развитие собственно экономики. Аналогично действует второй регион:

$$x_2(0) \rightarrow V_2 x_2(0) \begin{cases} (E - U_2(0)) B_2 x_2(0); \\ \Delta_2 U_2(0) B_2 x_2(0); \\ (E - \Delta_2) U_2(0) B_2 x_2(0); \end{cases}$$

Здесь $\Delta_2 U_2(0) B_2 x_2(0)$ - часть, идущая на развитие экологически чистых производств во втором регионе; $(E - \Delta_2) U_2(0) B_2 x_2(0)$ - часть, идущая на охрану окружающей среды второго региона, и $(E - U_2(0)) B_2 x_2(0)$ - часть, идущая на развитие экономики второго региона.

Тогда состояния экономических систем регионов в момент времени $t=1$ определяются из соотношений

$$\begin{aligned} x_1(1) &= (E - U_1(0)) B_1 x_1(0) - S_2 \Delta_2 U_2(0) B_2 x_2(0), \\ x_2(1) &= (E - U_2(0)) B_2 x_2(0) - S_1 \Delta_1 U_1(0) B_1 x_1(0), \end{aligned} \quad (1)$$

Из соотношений (1) видно, что состояния $(E - U_1(0)) B_1 x_1(0)$ и $(E - U_2(0)) B_2 x_2(0)$ уменьшаются соответственно на величины $S_2 \Delta_2 U_2(0) B_2 x_2(0)$ и $S_1 \Delta_1 U_1(0) B_1 x_1(0)$, где S_1, S_2 - матрицы порядка n с положительными элементами, называемые матрицами реакции или матрицами эквивалентности; Δ_1, Δ_2 - диагональные матрицы распределения ресурсов с неотрицательными элементами на диагоналях, не превышающими единицы. Величину $S_2 \Delta_2 U_2(0) B_2 x_2(0)$ можно проинтерпретировать таким образом.

Выделение вторым регионом части $\Delta_2 U_2(0) B_2 x_2(0)$ продуктов на развитие экологически чистых производств ведет к прямым или косвенным пропорциональным потерям $S_2 \Delta_2 U_2(0) B_2 x_2(0)$

продукции аналогичных экологически "грязных" производств первого региона (например, вследствие закрытия экологически "грязных" производств первого региона, находящихся на территории второго региона и т.д.). Значит, $S_2 \Delta_2 U_2(t) V_2 x_2(t)$ является своеобразной реакцией на экологическую политику второго региона. Аналогично интерпретируется величина $S_1 \Delta_1 U_1(t) V_1 x_1(t)$.

Изложенная интерпретация распределения ресурсов экономических систем отражает так называемую децентрализованную модель принятия решений в каждом регионе. Другая интерпретация связана с централизованным распределением ресурсов между экономическими системами регионов. В этом случае продукция $V_1 x_1(t)$ первого региона распределяется на собственное воспроизводство $(E - U_1(t)) V_1 x_1(t)$, ресурсы $\Delta_1 U_1(t) V_1 x_1(t)$, вкладываемые в развитие производств на территории второго региона (в том числе и экологически небезопасных), и ресурсы $(E - \Delta_1) U_1(t) V_1 x_1(t)$, выделяемые на охрану окружающей среды в первом регионе.

Аналогично распределяются ресурсы второго региона. В этом случае $S_2 \Delta_2 U_2(t) V_2 x_2(t)$ - дополнительные затраты ресурсов первого региона на ликвидацию экологических последствий функционирования на его территории производств второго региона. Аналогично интерпретируется величина $S_1 \Delta_1 U_1(t) V_1 x_1(t)$. Состояние экономических систем регионов в момент $t=1$ определяется соотношениями (1).

Обозначим

$$R_+^n(\varepsilon_1) = \{x_1 : x_1 \in R^n, x_1 \geq \varepsilon_1\}; \quad \varepsilon_1 \in R_+^n,$$

$$R_+^n(\varepsilon_2) = \{x_2 : x_2 \in R^n, x_2 \geq \varepsilon_2\}; \quad \varepsilon_2 \in R_+^n.$$

Величины ε_1 и ε_2 называются уровнями безопасности, т.е. считается, что состояние экономики каждого региона не должно быть строго меньше его уровня безопасности. Пусть M и L - подмножества множества $\{1, \dots, n\}$. Предположим, что множество индексов M - множество продуктов экономики второго региона, вредных с экологической точки зрения для первого региона; L - множество продуктов экономики первого региона,

вредных с экологической точки зрения для второго региона. Тогда, если выполняется условие

$$x_1(1) \in R_+(\varepsilon_1), \quad x_2(1) \in \bigcup_{t \in M} \{x_2: x_2 \in R^n, (x_2)_t < (\varepsilon_2)_t\}, \quad (2)$$

то первый регион достиг цели в эколого-экономическом взаимодействии со вторым регионом. Взаимодействие окончено.

При

$$x_2(1) \in R_+(\varepsilon_2), \quad x_1(1) \in \bigcup_{t \in L} \{x_1: x_1 \in R^n, (x_1)_t < (\varepsilon_1)_t\}, \quad (3)$$

второй регион достиг цели в эколого-экономическом взаимодействии с первым регионом. Взаимодействие окончено.

При

$$x_1(1) \in R_+(\varepsilon_1), \quad x_2(1) \in R_+(\varepsilon_2), \quad (4)$$

эколого-экономическое взаимодействие продолжается дальше для $t \geq 1$.

В остальных случаях взаимодействие оканчивается.

Состояние $(x_1(0), x_2(0))$ называется начальным, если оно удовлетворяет условию (4). Введем

Определение. Чистой стратегией первого (второго) игрока, управляющего распределением ресурсов в регионе, называется функция $u_1(\cdot)$ ($u_2(\cdot)$):

$$N_* \times R^{2n} \rightarrow [0, 1], \quad \text{т.е. } u_i(t, (x_1, x_2)),$$

$$(u_2(t, (x_1, x_2))) \in [0, 1]^n$$

для $(t, (x_1, x_2)) \in N_* \times R^{2n}$,

где $N_* = \{0, 1, \dots\}$.

Если заданы стратегии игроков, т. е. набор функций $u_1(\cdot) = (u_1^1(\cdot), \dots, u_1^n(\cdot))$, $u_2(\cdot) = (u_2^1(\cdot), \dots, u_2^n(\cdot))$, то тем самым однозначно определяются диагональные матрицы $U_1(\cdot)$ и $U_2(\cdot)$, диагональные элементы которых есть функции

$$u_1^1(\cdot), \dots, u_1^n(\cdot) \quad \text{и} \quad u_2^1(\cdot), \dots, u_2^n(\cdot).$$

Тогда если задано начальное состояние $(x_1(0), x_2(0))$, то однозначно определяется траектория экономических систем регионов.

Задача формулируется следующим образом. Для заданного начального состояния $(x_1(0), x_2(0))$ экономических систем регионов найти стратегию $u_1^{OP}()$ первого игрока, такую, что для любых реализаций стратегий второго игрока обеспечивается выполнение условия (2) для некоторого $t_* < \infty$, а также найти множество подобных начальных состояний.

Аналогично ставится задача с точки зрения второго игрока.

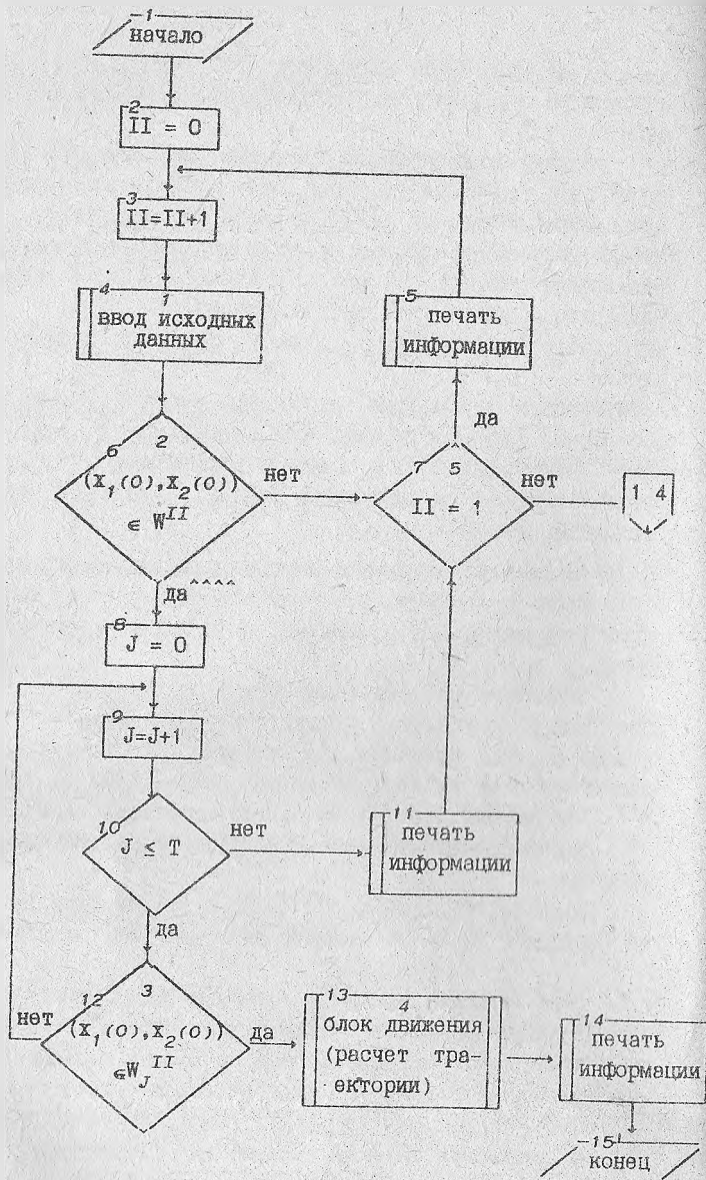
Численная реализация алгоритма решения сформулированных задач. Методика решения поставленных задач, алгоритмы решения разработаны в [2], здесь же просчитаны тестовые примеры на некотором наборе исходных данных. Приведем блок-схему алгоритма (рисунок).

В блок-схеме начальным входным параметром алгоритма является номер II региона, для которого считается оптимальная стратегия управления экономикой на заданном интервале времени $[0, T]$.

В начале расчеты ведутся для первого региона (II=1). Проверяется условие принадлежности начальных состояний $(x_1(0), x_2(0))$ множеству W^{II} состояний, из которых регион II достигает цели за неограниченное время. Если $(x_1(0), x_2(0)) \notin W^{II}$, то первый регион не может достигнуть цели, параметру II присваивается значение 2 и расчеты ведутся для второго региона.

Если $(x_1(0), x_2(0)) \in W^{II}$ и II=2, то ни один из регионов не достигает цели в эколого-экономическом взаимодействии.

Если $(x_1(0), x_2(0)) \in W^{II}$, последовательно строятся множества начальных состояний экономических систем W_J^{II} , из которых регион II может достигнуть цели не более, чем за J периодов развития независимо от экономической стратегии другого региона ($J=1, 2, \dots, T$). Если $(x_1(0), x_2(0)) \in W_J^{II}$ при $J \leq T$, то регион достигает цели за время $J \leq T$. Рассчитывается оптимальная стратегия управления экономикой для региона II и траектория экономических систем регионов. В противном случае регион II не достигает цели за время T. Управление передается в блок 5.



Рисунок

Пример I. Определим параметры взаимодействия:

$$B_1 = \begin{pmatrix} 1.0 & 0.5 \\ 0.5 & 1.0 \end{pmatrix}, \quad S_1 = \begin{pmatrix} 1.0 & 1.0 \\ 1.0 & 1.0 \end{pmatrix}, \quad \Delta_1 = \begin{pmatrix} 0.5 & 0.0 \\ 0.0 & 0.5 \end{pmatrix}$$

$$B_2 = \begin{pmatrix} 2.0 & 0.1 \\ 1.0 & 2.0 \end{pmatrix}, \quad S_2 = \begin{pmatrix} 0.5 & 0.5 \\ 0.5 & 0.5 \end{pmatrix}, \quad \Delta_2 = \begin{pmatrix} 0.5 & 0.0 \\ 0.0 & 0.5 \end{pmatrix}$$

$$x_1(0) = \begin{pmatrix} 5.0 \\ 5.0 \end{pmatrix}, \quad x_2(0) = \begin{pmatrix} 5.0 \\ 5.0 \end{pmatrix}, \quad \varepsilon_1 = \begin{pmatrix} 2.0 \\ 2.0 \end{pmatrix}, \quad \varepsilon_2 = \begin{pmatrix} 1.0 \\ 1.0 \end{pmatrix}$$

Согласно исходным данным примера I (в контексте интерпретации I распределения ресурсов), соотношения между параметрами экономических систем следующие. Из общего количества ресурсов, выделяемых на решение экологических проблем, каждый из регионов направляет 50 % ресурсов на создание собственных экологически чистых производств и 50 % - на охрану окружающей среды. Потери второго региона от экологической политики первого региона вдвое превышают аналогичные потери первого региона при одинаковых вложениях ресурсов каждого из регионов в создание экологически чистых производств. Темп роста экономики [1] первого региона вдвое ниже темпа роста второго. Уровни эколого-экономической безопасности для первого региона полагаются в два раза больше, чем для второго.

Из результатов расчета следует, что преимущество в темпе роста экономики второго региона привело второй регион к достижению цели за два периода.

Пример 2. Отличие от параметров взаимодействия в примере I состоит лишь в элементах матрицы Δ_1 и начальном состоянии $x_2(0)$ экономики второго региона, которые определяются следующим образом:

$$\Delta_1 = \begin{pmatrix} 0.5 & 0.0 \\ 0.5 & 0.0 \end{pmatrix}, \quad x_2(0) = \begin{pmatrix} 1.5 \\ 1.5 \end{pmatrix}$$

В этом случае, несмотря на снижение в два раза доли ресурсов, выделяемых первым регионом на создание экологически чистых производств, уменьшение начального количества ресурса второго региона приводит к тому, что ни один из регионов не

достигает цели в эколого-экономическом взаимодействии.

С п и с о к л и т е р а т у р ы

1. Макаров В.Л., Губинов А.И. Математическая теория экономической динамики и равновесие.- М.:Наука,1973.- 336 с.
2. Мсламов В.П. Моделирование процесса взаимодействия между экономическими системами/Кибернетика.- 1989.-N.4.- С. 57-63.
Получено 14.06.91

УДК 519.8

А.И. Гриненко

ИНФОРМАЦИОННАЯ КАРТОГРАФИЧЕСКАЯ СИСТЕМА КАК ЧАСТЬ ИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ МОНИТОРИНГА ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

Рассмотрены вопросы сбора цифровой картографической информации, создания структур картографического банка данных, роль и место картографической информационной системы в среде информационной системы мониторинга окружающей среды.

Внутреннее содержание географической оболочки, особенно ее земной поверхности, весьма неоднородно. Она состоит из сложных систем - физико-географических или природно-территориальных комплексов или геосистем. Каждый геосистемный комплекс представляет собой совокупность закономерно и территориально ограниченных сочетаний литолого-геоморфологических, водно-климатических, биологических, а также антропогенных компонентов природы земной поверхности. Адекватное изучение и мониторинг всей совокупности этих сочетаний на определенной территории возможны лишь на основе системного подхода, который, в свою очередь, предполагает создание и использование геоинформационных систем (ГИС) мониторинга окружающей среды на базе ЭВМ.

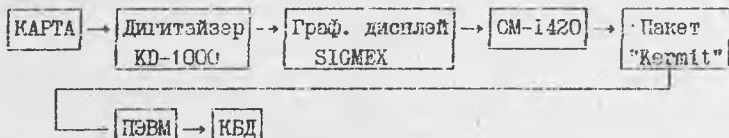
Создаваемая в СКБ ММС Института кибернетики имени В.М.Глушкова АН УССР ГИС ориентирована на решение широкого круга как прикладных, так и научных задач. Одной из основных составляющих этой информационной системы мониторинга окружающей среды является информационная картографическая система (ИКС), опирающаяся на картографический банк данных. Под информационной картографической системой следует понимать "...совокупность взаимосвязанных и взаимодействующих научных

ISBN 5-7702-0256-4 Компьютерные системы поддержки принятия решений в экологии. Киев, 1991.

концепций или технических принципов, методов, алгоритмов, приборов, функционирование которых имеет целью создание или использование картографических произведений как моделей геосистем" [1, с. 18].

Особое положение такой системы обусловлено тем, что по своей природе картографические данные, составляющие информационное содержание картографического банка данных, представляют собой наиболее наглядный и информационный, наиболее функциональный слой материалов географического обеспечения моделей динамики как природных, так и социально-экономических составляющих природно-территориальных комплексов.

Функционирующая ИИС имеет следующую структуру:



В качестве основного компонента ИИС содержит картографический банк данных (КБД), на основе которого происходит многостадийный процесс анализа пространственно-временной информации о геосистемах, посредством ведения математических и картографических моделей [2]. КБД должен отвечать ряду обязательных требований. Во-первых, систематизация и классификация входной информации, во-вторых, единообразное кодирование содержимого банка, в-третьих должна осуществляться возможность перехода от масштаба к масштабу и перевода из одной картографической проекции в другую.

Важнейшей частью банка данных является база картографических данных, создание которой связано с формированием информационных массивов, разработкой программ их обработки и СУБД [3]. Содержание КБД характеризуется следующим набором отношений картографической информации:

- файл картографического изображения;
- справка (регистрационный номер файла изображения, код по СОАГУ, гриф, дата, содержательное имя, вид карт);
- палитра изображения;
- тип карты, код;
- карта топографическая (номенклатура, код масштаба, масштаб, система высот, склонения);
- карта географическая (информация "легенды", семантика,

проекция, код масштаба).

Любой файл картографического изображения является самостоятельным компонентом базы данных и находится на высшем информационном уровне базы. КБД располагает двумя специализированными инструментальными программными пакетами: TOTO и NGAS. Пакет TOTO представляет собой программный продукт, предназначенный для автоматизированного формирования цифровых моделей местности и построения изображения рельефа способом изолиний. Пакет программ NGAS предназначен для построения, обработки и визуализации карт в растровом виде. Дополнительно NGAS позволяют вычислять площади и различные функциональные зависимости на любом участке построенного картографического изображения, а также проводить ряд работ редакторского характера. Оба пакета могут функционировать как в составе картографического банка, так и полностью самостоятельно.

В процессе дальнейшей разработки математического обеспечения КБД предстоит решить следующий ряд вопросов:

- создание системы учета картографических проекций и привязки информации к стандартной системе координат банка;

- разработка диалоговой системы банка - исследование вопросов визуализации картографического изображения и автоматизированного использования полученных карт;

- создание библиотеки условных картографических знаков;

- разработка условий для системного сочетания моделей КБД и математических моделей экологических структур.

Наиболее отработанная часть ИРС - подсистема преобразования исходной картографической информации в цифровой вид. В настоящее время в картографии применяются три основных способа дигитализации: точечный, линейный и сканирование, позволяющее определять положение элементов местности на карте координатами дискретных точек [4].

При точечной дигитализации последовательно измеряются координаты точек и регистрируются на техническом носителе с определенным семантическим признаком. Наиболее часто применяемый способ точечной дигитализации позволяет преобразовывать в цифровой вид точечные элементы карты, отрезки прямых линий и отрезки кривых с любой кривизной. При точечном способе цифрования отслеживание вручную имеет преимущества в том, что позволяет проводить дигитализацию различных карт без предва-

рительной их подгтовки.

Линейная дигитализация применяется в основном при преобразовании непрерывных кривых, где координаты точек измеряют с шагвым или временным интервалом.

Во время сканирования исходный графический оригинал независимо от своего содержания преобразуется в растровую матрицу. В результате сканирования черно-белый оригинал представляется двумерной матрицей, а цветной преобразуется в трехмерную матрицу, где цвет представлен определенным диапазоном чисел в элементах матрицы. Сканирование карт характеризуется высокой производительностью, но исключение информационной избыточности и сортировки точек по элементам картографического изображения требует сложного программного обеспечения и большого объема машинной памяти.

Подсистема ввода картографической информации представляет собой комплекс программных и аппаратных средств на базе ЭВМ СМ 1420. Первичное преобразование картографических данных в машинный вид производится точечным способом под управлением пакета программ обработки графической информации ИНТЕГРАД. Подсистема ввода исходной информации имеет следующий вид:

1. Цифрование контурной части обрабатываемого фрагмента карты с использованием дигитайзера XD 1000.

2. Оцифрованная информация визуализируется на экране графического дисплея SIGMEX. Программное обеспечение, при необходимости, позволяет оперативно вносить изменения в получаемую модель карты. По окончании ввода контурной части заполняются цветом замкнутые контуры и каждому ареалу присваивается определенный код области. Вся информация о контурах и замкнутых областях записывается на машинный носитель СМ 1420.

3. Программное обеспечение позволяет поэтапно редактировать результаты заполнения областей и переводить векторное изображение в растровый формат.

4. С использованием интерфейсного пакета "Kermit" цифровая модель карты в растровом формате преобразуется к файлу, доступному для обработки на ЛЭВМ.

5. Файл обрабатываемой карты становится файлом картографической базы данных.

При внешней громоздкости подсистемы ввода она обладает рядом существенных достоинств:

высокая точность ввода (порядка 0.2 мм в масштабе исходной карты);

возможность использования одновременно 14 цветовых кодов;

продуманное сервисное программное обслуживание процесса цифрования карт.

Параллельно с изложенной технологией дигитализации карт проводятся исследования по вопросам сканерного ввода изображений.

В заключение необходимо отметить следующее. Автоматизированные информационно-картографические системы можно рассматривать как развитие идеологии комплексных атласов, опирающееся на возможности современной вычислительной техники. Однако в отличие от атласов, отражающих статичную информацию, полученную на неопределенном участке времени, такие системы содержат динамическую, наращиваемую информацию, допускают обобщения многоцелевого характера, могут использоваться для решения оперативных задач использования и управления географическими комплексами.

С п и с о к л и т е р а т у р ы

1. Самышев К.А. Картоведение. - М.: Изд-во Моск. ун-та, 1982. - 132 с.

2. Жуков В.Т., Сербенюк С.Н., Тихонов В.С. Математико-картографическое моделирование в географии. - М.: Мысль, 1980. - 204 с.

3. Берлянд А.М. Автоматизация исследований по картам и научно-технический прогресс в науках о Земле //Автоматизация в тематической картографии. - М.: Изд-во Моск. ун-та, 1985. - 107 с.

4. Лыльков В.И. Получение цифровой модели местности методом дигитализации //Автоматизация крупномасштабного картографирования. - М., 1982. - 305 с.

Получено 14.06.91

УДК 519.8

А.Н.Билык, Н.А.Никифорович, С.В.Пашико, Ж.А.Черная

МОДЕЛИРОВАНИЕ МИГРАЦИИ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ В ПРЭСНОВОДНЫХ СИСТЕМАХ

Разработана математическая модель транспорта тяжелых металлов в пресноводных экосистемах, которая представляет собой систему уравнений, описывающих как механический перенос веществ, так и процессы химических трансформаций. На основе модели создан пакет программ.

В условиях интенсивного развития промышленного производства особую актуальность приобретает проблема загрязнения поверхностных водоемов тяжелыми металлами. Среди загрязняющих факторов окружающей среды металлы занимают отдельное место, поскольку они, в отличие от органических загрязнителей, не подвергаются химической и биологической деградации.

Известно, что различные формы одного и того же металла отличаются биологической активностью и токсичностью. Оказалось, что наибольшей токсичностью при концентрациях, превышающих предельно допустимые, обладают свободные некомплексованные ионы металлов. Установлено также, что очень важную роль в экотоксикологическом отношении, особенно для поливалентных металлов (хрома и др.), играют окислительно-восстановительные условия водной среды. С учетом этого возникает необходимость углубленного изучения состояния тяжелых металлов в пресноводных экосистемах и процессов, определяющих трансформацию одних форм металлов в другие при изменении условий внешней среды с целью прогнозирования качества воды и оценки экотоксикологической ситуации в водоеме.

Одним из наиболее эффективных средств решения данной задачи является математическое моделирование. Существуют различные по сложности и полноте описания математические модели динамики количественного и качественного состава природных вод. Однако качество воды в пресноводных экосистемах (реках, водохранилищах, эстуариях и т.п.) определяется целым рядом

ISBN 5-7702-0256-4 Компьютерные системы поддержки принятия решений в экологии. Киев, 1991.

сложных гидрологических, физико-химических и гидробиологических процессов. Поэтому при попытке создания универсальной модели, которая могла бы охватить достаточно широкий класс задач, возникающих при прогнозировании качества поверхностных вод и оценки экологической обстановки, возникают большие трудности. Действительно, в наиболее полной постановке с учетом основных механизмов распространения вещества в жидкости необходимо решать трехмерную нестационарную кавевую задачу в области с переменными границами.

В практике инженерно-экологических исследований широко применяется другой подход к решению указанных задач, позволяющий с достаточной полнотой и точностью получить оценки и прогнозировать динамику качества воды. Он заключается в использовании так называемых камерных (нуль-мерных) математических моделей. Исследуемый водный объект (система объектов) разбивается на отдельные области (камеры), характеризующиеся однородностью протекания изучаемых процессов, т.е. процессы усредняются в каждой камере. Связь между камерами осуществляется через водообмен и массообмен. В результате получаем дискретную по пространству и непрерывную по времени математическую модель, описывающую основные процессы формирования качества воды.

В рамках изложенного подхода построим математическую модель абиотической миграции загрязняющих веществ в системе К последовательных камер. Рассмотрим основные факторы, влияющие на изменение концентрации того или иного вещества, а именно: изменение речного стока, взаимодействие с подземными водами, влияние боковых притоков, поступление дренажных вод из гидромелиоративных систем, седиментация взвешенных в водной толще частиц, взмучивание донных отложений, безвозвратное водопотребление, поступление загрязнителей с промышленными и бытовыми стоками, трансформация вещества в результате физико-химического превращения. Тогда на основании закона сохранения массы вещества получаем систему линейных обыкновенных дифференциальных уравнений

$$\frac{dw_k}{dt} = q_{k-1} + \sum_{i=1}^{I_{k2}} q_{ki} + q_{kr} + q_{kb} + q_{kc} - q_{ks} - q_{kz} - q_{kz} \quad (1)$$

$$\frac{dc_{k,t}}{dt} = \sum_{s=1}^3 \frac{1}{W_k} \left[q_{k-1} c_{(k-1),ts} + \sum_{l=1}^{L_k} q_{k,l}^{оп} c_{k,l,t} + f_{k,t,s} + q_k^{др} c_{k,t,s} + q_k^{пб} c_{k,t,s} - (q_k + q_k^{вп} + \frac{dW_k}{dt}) c_{k,t,s} \right], \quad k=\overline{1, N}, \quad t=\overline{1, N}, \quad (2)$$

где W_k - объем k -й камеры;

q_k - сброс воды из k -й камеры;

L_k - число боковых притоков в k -ю камеру;

$q_{k,l}^{оп}$ - расход l -го бокового притока в k -ю камеру;

$q_k^{др}, q_k^{пб}, q_k^{ос}, q_k^{ис}, q_k^{вп}$ - соответственно расход дренажного стока, расход промышленно-бытового стока, осадки, испарение и безвозвратное потребление k -й камеры;

$c_{k,t}$ - концентрация в k -й камере t -й примеси;

s - номер формы существования t -й примеси ($s = 1$ обозначает растворимую форму, $s = 2$ -слаборастверимую, $s = 3$ -сорбированную);

$c_{k,t,s}$ - концентрация в k -й камере t -й примеси в s -й форме;

$c_{k,t,l}^{оп}$ - концентрация s -й формы t -й примеси в l -м притоке k -й камеры;

$f_{k,t,s}$ - массовый поток t -го вещества в s -й форме, поступающего в k -ю камеру через границу вода-дно и(или) вода-воздух;

$c_{k,t,s}^{др}, c_{k,t,s}^{пб}$ - концентрация в дренажных и промышленно-бытовых стоках соответственно t -го вещества в s -й форме для k -й камеры.

Уравнения (1), (2) получены в предположении, что все коэф-

Коэффициенты являются кусочно-постоянными функциями времени. Очевидно, должны выполняться балансовые уравнения

$$C_{kt} = C_{kt1} + C_{kt2} + C_{kt3}, \quad k=\overline{1, K}, \quad t=\overline{1, N}. \quad (3)$$

В любой камере и в любой момент времени концентрация веществ, обеспечивающая состояние химического равновесия ионно-солевого комплекса, удовлетворяет следующей системе уравнений:

$$C_{kt1} = X_{kt} + \sum_{j=n+1}^N \sum_{v \in V_{tj}} P_{tjv} a_{tjv} X_{kt}^{P_{tjv}} X_{kj}^{r_{tjv}}, \quad t=\overline{1, n}, \quad (4)$$

$$C_{kt2} = \sum_{j=n+1}^N \sum_{v \in V_{tj}^{(2)}} P_{tjv} X_{ktjv}^{(2)}, \quad t=\overline{1, n}, \quad (5)$$

$$C_{kj1} = X_{kj} + \sum_{t=1}^n \sum_{v \in V_{tj}} r_{tjv} a_{tjv} X_{kt}^{P_{tjv}} X_{kj}^{r_{tjv}}, \quad j=\overline{n+1, N}. \quad (6)$$

$$C_{kj2} = \sum_{t=1}^n \sum_{v \in V_{tj}^{(2)}} r_{tjv} X_{ktjv}^{(2)}, \quad j=\overline{n+1, N}. \quad (7)$$

$$X_{kt}^{P_{tjv}} X_{kj}^{r_{tjv}} + y_{ktjv} = x_{tjv}(X_k), \quad (t, j, v) \in V^{(2)}, \quad (8)$$

$$X_{ktjv}^{(2)} y_{ktjv} = 0, \quad (t, j, v) \in V^{(2)}, \quad (9)$$

$$C_{kt3} = \sum_{i=1}^m a_{kti}, \quad t=\overline{1, n}. \quad (10)$$

Где $k=\overline{1, K}$;
 n - число катионов;
 $N-n$ - число анионов;

V_{ij} - множество видов ионных пар, состоящих из катиона i -го вида и аниона j -го вида;

$V^{(2)}$ - множество соединений, которые могут образовывать слабо растворимые формы;

$V_{ij}^{(2)}$ - множество соединений, которые могут образовывать слабо растворимые формы и состоят из катиона i -го вида и аниона j -го вида;

X_{ki} - искомая концентрация i -го иона в свободном виде в k -й камере (моль/кг H_2O);

$X_k = (X_{k1}, X_{k2}, \dots, X_{kN})$;

ρ_{ijv}, γ_{ijv} - стехиометрические коэффициенты i -го катиона и j -го аниона соответственно ионной пары вида (i, j, v) ;

a_{ijv} - концентрационная константа устойчивости ионной пары вида (i, j, v) ;

y_{kijv} - неотрицательная неизвестная величина;

a, m - эмпирические постоянные;

$\alpha_{ijv}()$ - величина, характеризующая способность соединения вида (i, j, v) к растворению.

Уравнения (4), (5) являются уравнениями материального баланса i -го катиона в растворимой и слабо растворимой формах соответственно; уравнения (6), (7) аналогичны уравнениям для j -го аниона. Уравнения (8), (9) описывают процесс обмена между растворимой и слабо растворимой формами вещества. Уравнение (10) описывает процесс сорбции взвесями. Если

$$V_{ij} = \emptyset \quad (V_{ij}^{(2)} = \emptyset),$$

соответствующая сумма равна нулю.

В уравнениях (1)-(10) искомыми являются величины c_{ki} , c_{kjs} , X_{ki} , X_{kj} , X_{kijv} , y_{kijv} . Величину $\alpha_{ijvE}(X)$ определим по формуле

$$\alpha_{ijv}(X_k) = PR_{ijv} \gamma_i(X_k)^{-\rho_{ijv}} \gamma_j(X_k)^{-r_{ijv}}, \quad (i, j, v) \in V^{(2)}$$

где PR_{ijv} - термодинамическое произведение растворимости

соединения вида (i, j, v) ;

$\gamma_i(x_k), \gamma_j(x_k)$ - коэффициенты активности аниона и катиона, удовлетворяющие уравнению

$$\lg \gamma_m(x_k) = - z_m^2 \left(\frac{0.509 E^{1/2}(x_k)}{1 + E^{1/2}(x_k)} - 0.2 E(x_k) \right), \quad m=i, j;$$

$$E(x_k) = \frac{1}{2} \left[\sum_{i=1}^N z_i^2 x_{ki} + \sum_{i=1}^n \sum_{j=n+1}^N (p_{tju} z_i + r_{tju} z_j) + \sum_{v \in V_{tj}} a_{tju} x_{ki} x_{kj} \right],$$

где $E(x_k)$ - эффективная ионная сила раствора; z_i - заряд i -го иона.

Величину a_{tju} определим из уравнения

$$\lg a_{tju} = \lg \bar{a}_{tju} + (p_{tju} z_i + r_{tju} z_j) \left(\frac{0.509 F^{1/2}}{1 + F^{1/2}} - 0.2 F \right),$$

$i = \overline{1, n}, j = \overline{n+1, N}, v \in V_{tj}$,

где \bar{a}_{tju} - термодинамическая константа устойчивости,

F - формальная ионная сила раствора,

$$F = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^N z_i^2 c_{ki}.$$

Обозначим c_{kt}^{ox} концентрацию t -го вещества (загрязнителя) в k -й камере в окисленной форме, c_{kt}^{red} - его концентрации в восстановленной форме и определим их по формулам

$$c_{kt}^{red} = \frac{c_{kt}}{(1 + 10^{\frac{d_{kt}}{a_{kt}}})}, \quad c_{kt}^{ox} = c_{kt} - c_{kt}^{red}, \quad (11)$$

здесь

$$a_{k,t} = \frac{n_t (pE - E^0 / 0.059155)}{1 + 0.003(t_k - 25)} + m_t \text{pH};$$

n_t, m_t - количество электронов и протонов в полуреакции восстановления соответственно;

E^0 - стандартный потенциал полуреакции восстановления;

t_k - температура воды в k -й камере, $^{\circ}\text{C}$.

Величину pE определим по формуле

$$pE = \frac{Eh}{0.059155}$$

где Eh - окислительно-восстановительный потенциал раствора.

Если Eh воды не измерялся, pE рассчитываем следующим образом:

$$pE = 20.75 + \lg(P_{O_2})^{1/4} - \text{pH} \cdot 10$$

где P_{O_2} - парциальное давление кислорода.

Создано программное обеспечение, с помощью которого осуществляются расчеты по модели (1)-(11). Система уравнений (1), (2) решается методом Рунге-Кутты, причем на каждом шаге система, состоящая из уравнений (3)-(10), решается одной из версий метода Ньютона. На основе полученного решения рассчитываются концентрации загрязнителей в окисленной и восстановленной формах по формулам (11). Таким образом, в результате расчетов получаем концентрации веществ в свободной, ионной, комплексированной, сорбированной, окисленной и восстановленной формах в каждой камере в зависимости от времени.

с п и с о к л и т е р а т у р ы

I. Моделирование миграции техногенных загрязнений в почвах / С.Л.Кивва, С.В.Пашко, Ж.А.Черная, И.Л.Колябича, З.А.Побоялка // Системный анализ и методы математического

моделирования в экологии. - Киев: Ин-т кибернетики им. В.М.Глушкова АН УССР, 1990. - С. 30-36.

2. Лаврик В.И., Вильк А.Н., Нещайфорович Н.А. Математическое моделирование гидрохимического и кислородного режимов в реках и водохранилищах. - Киев, 1988. - 51 с. - (Препр./АН УССР. Ин-т гидробиологии; 88-1).

Получено 14.06.91

УДК 519.8

Г.Б.Ляшенко

МОДЕЛИРОВАНИЕ МИГРАЦИИ РАДИОНУКЛИДОВ С ПОВЕРХНОСТНЫМ СТОКОМ

Описаны математические модели поверхностного стока. Обоснован выбор модели для прогнозирования миграции радионуклидов с поверхностным стоком во время весеннего половодья.

Загрязненная радионуклидами территория, прилегающая к Чернобыльской АЭС, в результате аварии на четвертом блоке стала источником загрязнения водотоков, в том числе каскада водохранилищ на реке Днепр. Миграция радионуклидов в водотоки происходит путем поверхностного смыва, поэтому большое значение для получения практических рекомендаций по ограничению поступления нуклидов в водотоки имеет разработка на основе математического моделирования методов прогноза поверхностного стока как средства переноса загрязнителя.

Модели стока по степени сложности можно разделить на три части: камерные, т.е. эмпирические функции; одномерные, которые описываются обыкновенными дифференциальными уравнениями, и двумерные, которые описываются системой дифференциальных уравнений в частных производных.

При выборе действующей модели для прогноза миграции радионуклидов следует учитывать также количество и доступность требуемых входных параметров и сложность реализации на ЭВМ.

В [1] приведено обоснование того, что смыв нуклидов с поверхности почвы зависит от слоя стока линейно, поэтому рассмотрим модели, описывающие поверхностный сток и связанные

с ним величины.

Для реализации на ЭВМ наиболее подходят камерные модели. Камерная модель представляет собой функциональную зависимость выходной величины от входных параметров, полученную на основе эмпирических данных. Рассмотрим примеры.

Простейшие из них получены в результате применения линейной либо нелинейной регрессии, когда по многолетним наблюдениям с помощью различных методов (например, методом наименьших квадратов) строится зависимость одной величины от другой (рис. 1).

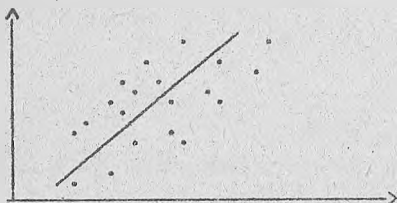


Рис. 1

Каждый исследователь предполагал зависимость требуемой величины от какого-либо одного, но самого значительного фактора, пренебрегая влиянием других факторов. Так, например, в [2] предложена зависимость инфильтрационных потерь от продолжительности снеготаяния в сутках:

$$P = 4.6 \cdot T^{-4},$$

где P - инфильтрационные потери талых вод, мм;

T - продолжительность снеготаяния, сут.

С помощью регрессионного подхода можно строить более сложные зависимости, например, в [2] предложена нелинейная зависимость

$$P = (\exp(-0.18t_0) - 0.23) X,$$

где X - запас воды в снежном покрове, мм;

P - инфильтрационные потери, мм;

$t_0 = 0.82 \pm 0.20$ - эмпирический параметр.

При этом погрешность моделирования может быть значительной, так как не учитываются другие факторы, влияющие на выходную величину.

Среди камерных моделей можно выделить подмножество таких, которые строятся на основе предположения о виде зави-

симости (линейная, экспоненциальная, степенная и т.п.) моделируемой величины от входных данных. В этом случае исследователь, используя входные и выходные данные, а также определенный функциональный вид модели, подбирает параметры, при которых модель будет адекватной, т.е. будет давать оценку моделируемой величины, близкую к реальной.

Так, предположив, что скорость инфильтрации в почву линейно зависит от дефицита влажности почвы и обратно от гидравлического уклона местности, можно создать модель [3]

$$V = \frac{0.2 + 0.1d_{II}}{1 + \sqrt{I}}$$

при промерзании почвы более 50 см и

$$V = \frac{0.4 + 0.2d_{II}}{1 + \sqrt{I}}$$

при промерзании почвы менее 50 см,

где V - скорость инфильтрации при таянии снега, мм/ч;

I - гидравлический уклон местности;

d_{II} - дефицит влажности почвы.

В [4] представлена модель, построенная на предположении того, что инфильтрационные потери экспоненциально зависят от глубины промерзания почвы, осеннего увлажнения почвы, а также линейно зависят от запасов воды в снеге и осадков:

$$P_{д} = (W + X) \exp \{ -0.5(0.025L + 0.01P_{к} - 1) \},$$

где $P_{д}$ - потери талых вод на инфильтрацию, мм;

W - максимальные запасы воды в снеге, мм;

X - осадки за время снеготаяния, мм;

L - глубина промерзания почвы, см;

$P_{к}$ - осеннее увлажнение почвы (мм в слое почвы 1 м).

Представленные камерные модели далеко не исчерпывают всего множества подобных моделей, но являются характерными и дают представление о данном классе моделей и способах их построения.

Класс моделей, описывающих процесс стока с помощью обыкновенных дифференциальных уравнений, строится исходя из уравнений баланса воды на площадке [5] (рис. 2).

В результате получим обыкновенное дифференциальное уравнение

$$\frac{dh}{dt} = (R(t) - I(t))10^{-3} - \frac{1}{n} h^{\frac{5}{3}}(t) + \frac{q_{вх}}{S}$$

с начальным условием $h(0) = 0$,

где h - средняя глубина потока, мм;

$R(t)$ - интенсивность осадков, мм/с;

$I(t)$ - интенсивность инфильтрации, мм/с;

$q_{вх}$ - расход воды на входе площадки, м³/с;

n - коэффициент шероховатости;

i - уклон;

B - средняя ширина склона, м (если предположить, что средняя длина склона l , то $S=Bl$).

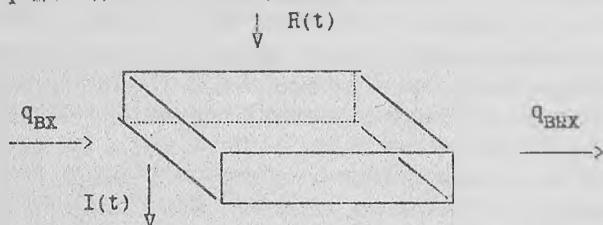


Рис. 2

Для моделирования связанных между собой величины (поверхностный сток и инфильтрация) строят системы дифференциальных уравнений в частных производных.

В представленной модели [6] поверхностный сток и инфильтрация являются расчетными величинами. Это система двух дифференциальных уравнений в частных производных.

Модель, имеющая в основе описание иного физического процесса, т.е. процесса весеннего снеготаяния, рассмотрена в [7]. В этом случае необходимо учесть, что процесс инфильтрации происходит в мерзлой почве и уравнение влагопереноса необходимо решать в комплексе с уравнениями теплопереноса, учитывая при этом баланс между водой и льдом. В [7] сделаны следующие допущения:

перенос массы осуществляется только в жидкой фазе под действием потенциала почвенной влаги;

температуры льда, незамерзшей влаги и скелета почвы равны;

влияние нерастворенных солей на передвижение влаги мало.

Эти допущения позволили записать систему трех дифферен-

циальных уравнений, которые в комплексе описывают влагоперенос, переход влаги из льда в воду и тепловой баланс между скелетом почвы, водой и льдом. Эта модель использует доступные параметры и дает удовлетворительное описание при небольших градиентах температуры в почве и медленном процессе снеготаяния.

Существует также класс моделей, описывающих поверхностный сток на плоскости с помощью системы дифференциальных уравнений в частных производных (уравнений Навье - Стокса и Сен - Веназа). Такие модели представлены в [8], [9].

Недостаток этих моделей заключается в том, что они описывают только ливневый сток, т.е. не учитывают особенностей снеготаяния, а также в том, что для их реализации требуется более двадцати параметров, не всегда доступных. Кроме того, здесь требуется задание функции поверхности водосбора, т.е. большого объема информации.

Исходя из постановки задачи и имеющихся входных данных было признано целесообразным применить комплексный подход, разработанный в СКБ ММС Института кибернетики им. В.М.Глушкова АН УССР совместно с Отделением географии АН УССР и представленный в [10]. Он состоит в разбиении территории на множество конечных элементов (ландшафтов) с усредненными характеристиками. Каждый ландшафт отличается типом почвы, поверхностью и растительным покровом, а следовательно, особенностями процесса смыва радионуклидов. Таким образом, к входным данным добавляются картографические данные, представленные в виде цветного растрового изображения (карты водосборов и ландшафтов). К таким же данным относятся карты загрязнения территории, которые строятся интерполяционным методом по сети измерений. Методы обработки графической информации представлены в [11]. Для прогноза стока на ландшафте наиболее выгодно использовать модель [4], учитывающую наиболее значительные факторы, которые влияют на формирование стока. Эта модель соответствует поставленной задаче, т.е. оценивает интегральный сток за время половодья, она построена с помощью экспоненциальной зависимости (что наилучшим образом отражает природу процесса инфильтрации) и верифицирована на основе многолетних наблюдений. Кроме того, она весьма удобна на практике, так как для работы с ней требуются доступные входные данные.

Этот подход реализован в системе RUNOFF, описанной в [12].

Опыт показывает, что применение моделей, оценивавших слой стока в любой точке водосбора, и требующих на входе большую детализацию процесса, огромный объем информации и сложную реализацию на ЭВМ, нецелесообразно. Так как большинство практических задач ставит целью получение конкретного результата (объем стока с водосбора, содержание нуклидов в стоке), то применение камерных моделей с подобранными параметрами приводит к удовлетворительным результатам (по опыту прогноза миграции радионуклидов в зоне ЧАЭС).

С п и с о к л и т е р а т у р ы

1. Борзилов В.А. Физико-математическое моделирование процессов, определяющих судьбу долгоживущих радионуклидов с водосборов тридцатикилометровой зоны ЧАЭС // Метеорология и гидрология. - 1989. - №1. С. 30-38.
2. Рубцов М.И. Условия формирования и метод расчета стоков половодья в открытом бассейне // Тр. УкрНИГМИ. - 1970. - Вып. 88. С. 121-125.
3. Кошелевко А.И. Расчет влагозапасов почвы по осадкам // Там же. - 1971 - Вып. 3.-С. 58-64.
4. Роданенко В.А. Расчет потерь талого стока во время весеннего половодья // Там же. - 1963. - Вып. 39.-С. 42-49.
5. Московкин В.М. Моделирование выноса наносов и пестицидов поверхностным стоком с сельскохозяйственных водосборов // Охрана вод от загрязнения поверхностным стоком. - Харьков, 1985. - №4.-С. 33-41.
6. Назаров Н.А. Численная реализация математической модели взаимодействия поверхностного и подземного стока по данным наблюдений на воднобалансовых площадках Приморья и Валдая // Географические исследования в МГУ. - М.: Изд-во Моск. ун-та, 1976. - 135 с.
7. Митовилов Ю.Г. Численное моделирование процесса инфильтрации воды в мерзлые почвы // Метеорология и гидрология. - 1977. - №9.-С. 67-72.
8. Кучмент Л.С. Формирование речного стока. - М.: Наука, 1983. - 233 с.
9. Монин А.С. Гидродинамическое уравнение гидрологии

суши // Докл. АН СССР. - 1979. - 246, №5. - С. 1048-1051.

Ю. Морозов А.А., Черпурной Н.Д. et al. - CHESSE - Chernobyl Simulation System // Informatik für den Umweltschutz, 5 Symposium, 19-21 September 1990. Proceedings. - Wien, Österreich.

II. Линник В.Г., Линник Н.И., Ляшенко Г.Б. Программные средства отображения и анализа полей загрязнения радионуклидами для района аварии ЧАЭС // Системный анализ и методы математического моделирования в экологии. - Киев: Ин-т кибернетики им. В.М. Глушкова АН УССР, 1990. - С. 20-28.

12. Шевело П.В. Интегрированная система RUNOFF // Там же. - С. 28-30.

Получено 14.06.91

УДК 519.21

В.В. Ситник

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЕРОЯТНОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ВЕЛИЧИН ИЗМЕРЕНИЯ В РАДИОЭКОЛОГИЧЕСКОМ МОНИТОРИНГЕ С ПОМОЩЬЮ ЭКСПЕРТНОЙ СИСТЕМЫ

Приведен алгоритм определения вероятности нахождения промеров некоторой физической величины в заданном интервале с учетом результатов проведенной независимой экспертизы. Разработанный алгоритм входит составной частью в разрабатываемый видеостатграфический пакет поддержки принятия решений в радиэкологическом мониторинге.

При создании радиэкологического мониторинга мы имеем дело с нечеткими каналами наблюдений [1], вносящими определенные систематические ошибки, негативно влияющие на достоверность получаемой информации. Как правило, в подобной ситуации должна существовать система независимых экспертов, позволяющая дать аргументированное заключение о принадлежности измеряемой величины (отфильтрованной от различных неточностей, вызванных несовершенством приборов, методик и т.д.) некоторому доверительному интервалу. В предлагаемом подходе при изучении информации, поступающей с нечеткого канала

ISBN 5-7702-0256-4 Компьютерные системы поддержки принятия решений в экологии. Киев, 1991.

наблюдений, с помощью системы экспертов проводится расчет вероятности нахождения измеряемой величины в заданном интервале с учетом результатов проведенной экспертизы.

Пусть $\xi_k + t$ - результат измерения некоторой физической величины на данной местности, т.е. данная величина измеряется с некоторой аддитивной ошибкой t . Вполне очевидно, что для каждой физической величины ξ_k , $k=1, 2, \dots$ существует свой интервал $(\alpha_H^{(k)}, \alpha_B^{(k)})$ допустимых значений.

Пусть имеется некоторая система экспертов, позволяющая судить о принадлежности ξ_k интервалу $(\alpha_H^{(k)}, \alpha_B^{(k)})$ следующим образом: во-первых, имеется $m+n$ независимых экспертов, причем считается, что n экспертов дают отрицательную оценку, если $\xi_k + t < \alpha_H^{(k)}$ (т.е. индикаторы этих событий равны 0), и положительную в обратном случае; во-вторых, m экспертов дает отрицательную оценку, если $\xi_k + t < \alpha_B^{(k)}$ (индикаторы этих событий равны 0), и положительную в обратном случае; в-третьих, вполне возможно, что каждый эксперт вносит в измерения ошибку: $t_H^{(i)}$ - для i -го эксперта из совокупности $I_n = (1, 2, \dots, n)$ экспертов и $t_B^{(j)}$ - для j -го эксперта из совокупности $I_m = (n+1, n+2, \dots, n+m)$ экспертов. Но упрощая общности, положим $\xi_k = \xi$, $k=1, 2, \dots$ и $\alpha_H^{(k)} = \alpha_H$, $\alpha_B^{(k)} = \alpha_B$, $k=1, 2, \dots$. Если обозначить $I_H^{(i)}(\xi)$ значение i -го эксперта (индикатора) из совокупности экспертов I_n , а $I_B^{(j)}(\xi)$ - значение j -го эксперта (индикатора) из совокупности экспертов I_m , то

$$I_H^{(i)}(\xi) = \begin{cases} 1, & \xi + t + t_H^{(i)} \geq \alpha_H \\ 0, & \xi + t + t_H^{(i)} < \alpha_H, \quad i=1, 2, \dots, n; \end{cases}$$

$$I_B^{(j)}(\xi) = \begin{cases} 1, & \xi + t + t_B^{(j)} < \alpha_B \\ 0, & \xi + t + t_B^{(j)} \geq \alpha_B, \quad j=1, 2, \dots, m. \end{cases}$$

Теперь правомочен вопрос: чему равна вероятность того, что ξ принадлежит (α_H, α_B) , если значение 1 приняли ровно k экспертов из совокупности I_n и l экспертов из совокупности I_m .

Введем обозначения:

$$F_{\xi}(x) = P(\xi < x), F_t(y) = P(t < y),$$

$$F_H(u) = P\{t_H^{(i)} < u\}, F_B(v) = P\{t_B^{(j)} < v\} -$$

функции распределения величин $\xi, t, t_H^{(i)}, t_B^{(j)}$ соответственно, а $f_{\xi}(x), f_t(y), f_H(u), f_B(v)$ - плотности распределений, если они существуют.

Пусть A_n - событие, состоящее в том, что значение I приняли величины

$$I_H^{(i_1)}(\xi), I_H^{(i_2)}(\xi), \dots, I_H^{(i_n)}(\xi), \text{ а остальные величины}$$

$$I_H^{(i_1)}(\xi), I_H^{(i_2)}(\xi), \dots, I_H^{(i_n)}(\xi) \text{ приняли значение } 0.$$

Очевидно,

$$A_n = \sum_{\langle i_1, i_2, \dots, i_n \rangle} A_{i_1, i_2, \dots, i_n} \quad (1)$$

где суммирование ведется по всевозможным значениям индексов i_1, i_2, \dots, i_n из совокупности I_n , а A_{i_1, i_2, \dots, i_n} - событие,

состоящее в том, что $I_H^{(i_1)}(\xi), I_H^{(i_2)}(\xi), \dots, I_H^{(i_n)}(\xi)$ равны единице. Аналогично, B_n - событие, состоящее в том, что значение I приняли i величины $I_B^{(j_1)}(\xi), I_B^{(j_2)}(\xi), \dots, I_B^{(j_l)}(\xi)$, а остальные величины $I_B^{i+1}(\xi), I_B^{i+2}(\xi), \dots, I_B^m(\xi)$ приняли значение 0.

Очевидно,

$$B_n = \sum_{\langle j_1, j_2, \dots, j_l \rangle} B_{j_1, j_2, \dots, j_l} \quad (2)$$

где B_{j_1, j_2, \dots, j_l} - событие, состоящее в том, что индикаторы $I_B^{(j_1)}(\xi), I_B^{(j_2)}(\xi), \dots, I_B^{(j_l)}(\xi)$ равны единице.

Справедлива

ТЕОРЕМА. Пусть случайные величины $\xi, t, t_H^{(i)}, t_B^{(j)}$, $i \in I_n, j \in J_m$ взаимно независимы с функциями распределения $F_\xi(x), F_t(y), F_H(u), F_B(v)$, где $F_\xi(x)$ - функция $N(0,1)$ распределенной случайной величины; $F_t(y), F_H(u), F_B(v)$ - функции распределения равномерно распределенных в интервале $(-a, a)$ случайных величин $t, t_H^{(i)}, t_B^{(j)}, i \in I_n, j \in J_m$ соответственно. Тогда

$$P_{ki} = P\{\xi \in (\alpha_H, \alpha_B) / A_k, B_i\} = d_1(k, i) / d_2(k, i),$$

$$\text{где } d_1(k, i) = \sum_{t=1}^{n-k} \sum_{j=1}^i C_{tj}^{(k)} (2a)^{k+t+j+1} [F_\xi(\alpha_H+2a) - F_\xi(\alpha_H)] -$$

$$- \int_{\alpha_H}^{\alpha_H+2a} (2a - \alpha_H + x)^{k+t+j+1} dF_\xi(x),$$

$$d_2(k, i) = \sum_{t=1}^{n-k} \sum_{j=1}^i C_{tj}^{(k)} \left(\int_{\alpha_H}^{\alpha_H+2a} (4a - \alpha_H + x)^{k+t+j+1} dF_\xi(x) - \right.$$

$$\left. - \int_{\alpha_H}^{\alpha_H+2a} (2a - \alpha_H + x)^{k+t+j+1} dF_\xi(x) \right),$$

$$\text{а } C_{tj}^{(k)} = \frac{(-1)^m C_n^k C_{n-k}^t C_m^j}{(2a)^{m+k+t} (k+1+j+1)} (\alpha_B + \alpha_H - 4a)^{m-j}.$$

Доказательство. Так как суммирование в (1) ведется по всевозможным выборкам k номеров из n , то число слагаемых в этой сумме равно C_n^k . По той же причине, число слагаемых в сумме (2) равно C_m^j .

Поскольку слагаемые в каждой из сумм несогласованы, то

$$P_{ki} = \sum_{\langle t_1, \dots, t_k \rangle \in J_1, \dots, J_i} \sum P \left[\frac{\xi \in (\alpha_H, \alpha_B)}{A_{t_1, t_2, \dots, t_k} B_{j_1, j_2, \dots, j_i}} \right] \quad (3)$$

и в силу независимости и одинаковой распределенности индикаторов, все слагаемые в (3) равны между собой, поэтому

$$P_{k,l} = C_n^k C_m^l P \left[\frac{\xi \in (\alpha_H, \alpha_B)}{A_{t_1, t_2, \dots, t_k} B_{j_1, j_2, \dots, j_l}} \right] = \quad (4)$$

$$= C_n^k C_m^l \frac{P(\xi \in (\alpha_H, \alpha_B))}{P(A_{t_1, t_2, \dots, t_k} B_{j_1, j_2, \dots, j_l})}$$

Подсчитаем вероятности, участвующие в соотношении (4):

$$P(A_{1,2,\dots,k}, B_{1,2,\dots,l}) = P(I_H^{(1)} = 1, I_H^{(2)} = 1, \dots, I_H^{(k)} = 1, \\ I_H^{(k+1)} = 0, \dots, I_H^{(n)} = 0, I_B^{(1)} = 1, I_B^{(2)} = 1, \dots, I_B^{(l)} = 1, I_B^{(l+1)} = 0, \\ \dots, I_B^{(m)} = 0) = P(\xi + t + t_H^{(i)} \geq \alpha_H, i = \overline{1, k}, \xi + t + t_H^{(i)} < \alpha_H, \\ i = \overline{k+1, n}, \xi + t + t_B^{(j)} < \alpha_B, j = \overline{1, l}, \xi + t + t_B^{(j)} \geq \alpha_B, j = \overline{l+1, m}) = \\ \int_{-\infty}^{\infty} \int P(t_H^{(i)} \geq \alpha_H - x - y, i = \overline{1, k}; t_H^{(i)} < \alpha_H - x - y, i = \overline{k+1, n}; \\ t_B^{(j)} < \alpha_B - x - y, j = \overline{1, l}; t_B^{(j)} > \alpha_B - x - y, j = \overline{l+1, m} / \xi = x, \\ t = y) dF_{\xi}(x) dF_{\xi}(y)$$

Так как все величины взаимно независимы, то

$$P(A_{1,2,\dots,k}, B_{1,2,\dots,l}) = \\ = \int_{-\infty}^{\infty} \int \prod_{i=1}^k P(t_H^{(i)} > \alpha_H - x - y) \times \prod_{i=k+1}^n P(t_H^{(i)} < \alpha_H - x - y) \times \\ \times \prod_{j=1}^l P(t_B^{(j)} < \alpha_B - x - y) \times \prod_{j=l+1}^m P(t_B^{(j)} \geq \alpha_B - x - y) dF_{\xi}(x) dF_{\xi}(y)$$

и учитывая, что величины $t_H^{(i)}$ одинаково распределены с функцией распределения $F_H(u)$ и $t_B^{(j)}$ одинаково распределены с функцией распределения $F_B(v)$, получим окончательно

$$P\{A_{1,2,\dots,k}, B_{1,2,\dots,l}\} = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} (1-F_H(\alpha_H-x-y))^k F_H^{n-k}(\alpha_H-x-y) \times \\ \times F_B^l(\alpha_B-x-y) (1-F_B(\alpha_B-x-y))^{m-l} dF_{\xi}(x) dF_t(y).$$

Вероятность, стоящая в числителе выражения (4), будет отличаться лишь тем, что ξ может изменяться лишь в пределах (α_H, α_B) , поэтому

$$P\{\xi \in (\alpha_H, \alpha_B), A_{1,2,\dots,k}, B_{1,2,\dots,l}\} = \\ = \int_{\alpha_H}^{\alpha_B} \int_{-\infty}^{\infty} (1-F_H(\alpha_H-x-y))^k F_H^{n-k}(\alpha_H-x-y) F_B^l(\alpha_B-x-y) \times \\ \times (1-F_B(\alpha_B-x-y))^{m-l} dF_{\xi}(x) dF_t(y).$$

Имеем

$$P_{kl} = \frac{C_n^k C_n^l \int_{\alpha_H}^{\alpha_B} \int_{-\infty}^{\infty} (1-F_H(\alpha_H-x-y))^k F_H^{n-k}(\alpha_H-x-y) F_B^l(\alpha_B-x-y) \times \\ \times (1-F_B(\alpha_B-x-y))^{m-l} dF_{\xi}(x) dF_t(y)}{\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} (1-F_H(\alpha_H-x-y))^k F_H^{n-k}(\alpha_H-x-y) F_B^l(\alpha_B-x-y) \times \\ \times (1-F_B(\alpha_B-x-y))^{m-l} dF_{\xi}(x) dF_t(y)} \quad (5)$$

Так как все ошибки равномерно распределены в интервале $(-\alpha, \alpha)$, т.е.

$$F_H(x) = F_B(x) = F_t(x) = \begin{cases} \frac{x+\alpha}{2\alpha}, & -\alpha \leq x \leq \alpha \\ 1, & x > \alpha \\ 0, & x < -\alpha \end{cases}$$

а ξ - гауссова случайная величина $N(0,1)$ распределенная, то

можем записать

$$1 - F_H(\alpha_H - x - y) = 0 \quad \text{при } x + y < \alpha_H - \alpha.$$

$$F_H(\alpha_H - x - y) = 0 \quad \text{при } x + y < \alpha_H - \alpha,$$

$$1 - F_B(\alpha_B - x - y) = 0 \quad \text{при } x + y < \alpha_B - \alpha,$$

$$F_B(\alpha_B - x - y) = 0 \quad \text{при } x + y > \alpha_B - \alpha.$$

Следовательно, подынтегральное выражение отлично от нуля лишь при $\alpha_B - \alpha < x + y < \alpha_H + \alpha$.

Обозначим $Q(x, y)$ подынтегральное выражение в (5). Тогда

$$P_{k,l} = \frac{\int_{\alpha_H - \alpha < x < \alpha_B} \int_{\alpha_B - \alpha < x + y < \alpha_H + \alpha} Q(x, y) dF_{\xi}(x) dF_{\zeta}(y)}{\int_{\alpha_B - \alpha < x + y < \alpha_H + \alpha} Q(x, y) dF_{\xi}(x) dF_{\zeta}(y)} \cdot C_n^k C_m^l.$$

Отметим, что при $\frac{\alpha_B - \alpha_H}{2}$ вероятность $P_{k,l}$ отлична от нуля лишь в тех случаях, если хотя бы одно из чисел $k, n-k, l, m-l$ равно нулю, в зависимости от того, какое значение примет $\xi + \zeta$:

- I. $k=0, \quad m-l=0.$
- II. $m-l=0, \quad k\text{-любое}$ неотрицательное.
- III. $n-k=0, \quad m-l=0.$
- IV. $n-k=0, \quad l\text{-любое}.$
- V. $n-k=0, \quad l=0.$

Для каждой из соответствующих областей будет свое выражение для вероятности $P_{k,l}$.

В интервале (α_H, α_B) ξ может лишь находиться в случаях II, III, IV. Случай III очевиден: все индикаторы дают положительный ответ, т.е. все равны I. Вероятность, что в этом случае ξ лежит в установленном интервале, равна I.

Следовательно, представляют интерес случаи II и IV. Рассмотрим случай II. Пусть

$$I_{k, n-k, m}(\gamma, x) = \left(1 - \frac{\alpha_H - x - y - \alpha}{2\alpha}\right)^k \left(\frac{\alpha_H - x - y - \alpha}{2\alpha}\right)^{n-k} \left(\frac{\alpha_B - x - y - \alpha}{2\alpha}\right)^m.$$

Тогда

$$P_{km} = C_n^k \frac{\int_{\alpha_H - \alpha \leq x+y < \alpha_B + \alpha} \int_{\alpha_H \leq x < \alpha_B} \int_{-\alpha \leq y < \alpha} I_{k, n-k, m}(y, x) dy dF_{\xi}(x)}{\int_{\alpha_H - \alpha \leq x+y < \alpha_B + \alpha} \int_{-\alpha \leq y < \alpha} I_{k, n-k, m}(y, x) dy dF_{\xi}(x)} =$$

$$= C_n^k \frac{\int_{\alpha_H + 2\alpha}^{\alpha_H + \alpha - x} \left[\int_{-\alpha}^{\alpha} I_{k, n-k, m}(y, x) dy \right] dF_{\xi}(x)}{\int_{\alpha_H - 2\alpha}^{\alpha_H - \alpha - x} \left[\int_{\alpha_H - \alpha - x}^{\alpha} I_{k, n-k, m}(y, x) dy + \int_{-\alpha}^{\alpha} I_{k, n-k, m}(y, x) dy \right] dF_{\xi}(x)}$$

В скобках в знаменателе стоит то же, что и в числителе. Внутренние интегралы имеют вид

$$\frac{(-1)^{n+m-k}}{(2\alpha)^{n+m}} \int_{\alpha_1}^{\beta} (y+\alpha_1)^k (y+\alpha_2)^{n-k} (y+\alpha_3)^m dy = I,$$

где $\alpha_1 = 2\alpha - \alpha_H + x + \alpha$;

$\alpha_2 = x + \alpha - \alpha_H$;

$\alpha_3 = x + \alpha - \alpha_B$

и могут быть подсчитаны в явном виде

$$I = \frac{(-1)^{n+m-k}}{(2\alpha)^{n+m}} \sum_{i=1}^{n-k} \sum_{j=1}^m C_{n-k}^i C_m^j (\alpha_2 - \alpha_1)^{n-k-i} (\alpha_3 - \alpha_1)^{m-j} \times$$

$$\times \frac{1}{k+i+j+1} \left[(\beta + \alpha_1)^{k+i+j+1} - (\alpha_1 + \alpha_1)^{k+i+j+1} \right].$$

Подставляя в числителе $\alpha_1 = -\alpha$, $\beta = \alpha_H + \alpha - x$ и в знаменателе $\alpha_1 = \alpha_H - \alpha - x$, $\beta = \alpha$ для первого интеграла и $\alpha_1 = -\alpha$, $\beta = \alpha_H + \alpha - x$ для второго интеграла, получим окончательный результат в случае II:

$$P_{km} = C_{\alpha_H}^h \int_{\alpha_H}^{\alpha_H+2\alpha} \left[\frac{(-1)^{n+m-k}}{(2\alpha)^{n+m}} \sum_{l=1}^{n-k} \sum_{j=1}^m \frac{C_{n-k}^l C_m^j}{k+l+j+1} (-2\alpha)^{n-k-l} \right. \\ \left. \times (\alpha_B - \alpha_H - 4\alpha)^{m-j} \left[(2\alpha)^{k+l+j+l} - (2\alpha - \alpha_H + X)^{k+l+j+1} \right] dF_{\xi}(x) \right] \times \\ \times \left[\int_{\alpha}^{\alpha+2\alpha} \left[\frac{(-1)^{n+m-k}}{(2\alpha)^{n+m}} \sum_{l=1}^{n-k} \sum_{j=1}^m \frac{C_{n-k}^l C_m^j}{k+l+j+1} (-2\alpha)^{n-k-l} \right. \right. \\ \left. \left. \times (\alpha_B - \alpha_H - 4\alpha)^{m-j} \left[(4\alpha - \alpha_H + X)^{k+l+j+1} - (2\alpha - \alpha_H + X)^{k+l+j+1} \right] dF_{\xi}(x) \right]^{-1} \right]$$

Тогда формула для искомой вероятности будет иметь вид

$$P_{km} = d_1(k,m) / d_2(k,m).$$

Аналогично, в силу симметрии задачи можно подсчитать P_{ni} в случае IV.

Теорема доказана.

С п и с о к л и т е р а т у р ы

I. Zadeh, L.A. et al. Fuzzy Sets and their Applications to Cognitive and Decision Processes. - New York, 1975. - 175 p.

Получено 14.06.91

УДК 631.3.06/519.682.9

А.И.Соколов, И.А.Попов

AGROTESH - ЭКСПЕРТНАЯ СИСТЕМА С ПОПОЛНЯЕМОЙ БЗ ДЛ Я ИНТЕНСИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЯ В РАСТЕНИЕВОДСТВЕ

Описана экспертная система для информационной поддержки интенсивного растениеводства в сельском хозяйстве.

В настоящее время актуальной задачей агропромышленного комплекса (АПК) является увеличение производства продукции с удовлетворением требований сохранения и восстановления плодородия почв, экологической чистоты продуктов. Это возможно

ISBN - 5-7702-0256-4 Компьютерные системы поддержки принятия решений в экологии. Киев, 1991.

только при тщательном соблюдении научно обоснованных технологий адаптивного растениеводства, осуществлении всех мероприятий с учетом почвенно-климатических условий и состояния растений в конкретный период их развития. Реализация таких мероприятий требует повышения информированности специалистов сельскохозяйственного производства (агрономов, животноводов, семеноводов, бригадиров) с целью принятия ими оптимальных решений, согласованных с новейшими апробированными технологиями, аккумулирующими знания и опыт ведущих ученых и практиков.

Процесс информатизации АПК, широкое внедрение средств вычислительной техники позволяет использовать новейшие информационные технологии, главное направление развития которых - создание баз знаний и экспертных систем [1].

Обсуждаемая ниже экспертная система (ЭС) AGROTESH на базе ЭВМ иллюстрирует один из возможных путей внедрения информационных технологий в сферу сельскохозяйственного производства. При разработке концепции этой ЭС авторы исходили из необходимости обеспечения возможности удобного доступа пользователя к описанию технологии возделывания культуры, с одной стороны, и документирования вторичной информации, касающейся выполнения технологических мероприятий и состояния посевов на разных этапах развития растений - с другой. Характер входных и выходных данных задачи определяет специфические требования к содержанию базы знаний (БЗ) ЭС и методу логического вывода при согласовании цели поиска. Особенность данной задачи с точки зрения построения ЭС - наличие большого числа конечных целей и непосредственная связь между результатами их согласования. (Все конечные цели соответствуют агротехническим мероприятиям, составляющим технологию, выполняемым пользователем естественным образом в жестком соответствии с текущим периодом обработки почвы и фазой развития растений в настоящий период и согласуются однократно на длительный промежуток времени). В качестве иллюстрации к сказанному приведем пример системы из двух правил продукции описываемой ЭС, где мероприятие "вспашка" являлось целью консультации на предыдущем временном интервале технологии:

Если

вспашка = проводится

то

чизелевание = не проводится .

Если

вспашка = не проводится

то

чизелевание = проводится .

Таким образом, в силу взаимного влияния конечных целей очевидна необходимость длительного хранения результатов их согласования, т.е. модификация текстового файла БЗ.

Алгоритм логического вывода построен на основе обратного поиска путем последовательного перебора целей с отсечением. Согласование цели происходит рекурсивно, в три этапа:

анализ базы объектов;

поиск и согласование правила, содержащего цель;

согласование цели пользователем.

Переход к каждому следующему этапу осуществляется, если на предыдущем цель не согласована. Взаимодействие с пользователем основано на использовании словаря, что устраняет возможность ввода несуществующих в БЗ значений объектов. Если пользователь принимает консультацию к исполнению, согласованная цель заносится в файл базы знаний и используется в последующих сеансах работы с программой. Отказавшись же от последующей консультации, пользователь также получает возможность дальнейшего использования результатов консультации по этому мероприятию, однако только в текущем сеансе работы.

К достоинством данной ЭС авторы причисляют возможность редактирования всех составляющих ее БЗ, что позволяет фактически корректировать технологию. При этом обеспечивается контроль за изменением основных компонентов БЗ с целью предотвращения ошибок в процессе консультации. Системой также поддерживается режим создания пользователем новой БЗ "с нуля" на основе имеющейся у него сельскохозяйственной технологии, что расширяет возможности системы AGROTECH и превращает ее фактически в оболочку ЭС.

Кроме того, в силу специфики сферы применения настоящая программа поддерживает функции, вообще говоря, не свойственные экспертным системам. Кратко остановимся на них.

Использование сложных интенсивных технологий в растениеводстве предъявляет жесткие требования к технологической дисциплине выполнения рекомендаций, несоблюдение которых

может повлечь за собой как ухудшение качества сельскохозяйственной продукции, так и снижение урожая. Поэтому для контроля выполнения рекомендаций технологии представляется целесообразным последовательное документирование выполняемых технологических мероприятий, сроков их проведения, точности соблюдения полученных рекомендаций (все перечисленные компоненты составляют постепенно заполняемый дневник полевых работ).

Наряду с прямым контролем качества выполнения технологии используется также косвенный, когда на основе сопоставления содержимого дневника с динамикой эволюции важнейших показателей развития растений строятся выводы о последствиях выполненных мероприятий. (Заметим, кстати, что представляемый системой материал для такого сопоставления может быть использован растениеводом - исследователем для разработки, совершенствования технологии или адаптации ее к конкретным почвенно-климатическим условиям.) Для облегчения такого сопоставления программа поддерживает режим диагностики отклонения состояния посевов от оптимальных на основе списка возможных причин той или иной патологии растений.

Таким образом, ЭС AGROTECH обеспечивает:

проведение консультаций по вопросам технологий и сроков выполнения мероприятий, составляющих интенсивные технологии возделывания сельскохозяйственных культур;

поддержку диагностических сообщений о возможных нарушениях технологии и прочих причинах, обусловивших отклонения характеристик посевов от оптимальных;

документирование характеристик и сроков проведения технологических операций и создание, таким образом, истории проведения мероприятий на данном участке поля;

поэтапное документирование хода производственного процесса;

запись всех необходимых характеристик состояния посевов на каждом этапе развития растений;

создание, просмотр и редактирование базы знаний ЭС.

База знаний ЭС AGROTECH включает в себя элементы, необходимые для обеспечения логического вывода при выполнении функции консультации:

факты - тройки "объект - возможные значения - текущее значение";

правила производственного типа;

вопросы к объектам;
тексты объяснений фактов, описывающих технологические мероприятия;

а также компоненты, составляющие основу всех остальных функций ЭС:

шкалы для разбиения значений числовых объектов на интервалы;

перечни мероприятий технологии в соответствии с периодами обработки почв и фазами развития растений;

диагностические сообщения об отклонениях от технологии;

возможные значения характеристик растений по фазам развития.

Система поддерживает многохозяйственный режим (100 хозяйств, в каждом из которых может обслуживаться до 100 полей, каждое из которых, в свою очередь, может быть разбито на 50 или менее участков под возделывание на них различных культур). Список хозяйств и участков может дополняться пользователем. В рамках указанных значений ограничения на общее число обслуживаемых земельных участков обусловлены объемом дисковой памяти компьютера. Доступ к персональной БЗ пользователя обеспечивается посредством выбора номера хозяйства из каталога системы и указания поля и культуры, возделываемой на нем. Первоначально всем пользователям одной системы предоставляются одинаковые технологии. Разумеется, каждому земельному участку соответствует свой раздел БЗ "Факты", содержащий информацию о проведенных на нем мероприятиях. Пользователь, изменяющий остальные компоненты БЗ по какой-либо культуре, фактически создает свою технологию и в дальнейшем работает только с ней.

Система AGROTECH информационно согласована с системой AGRSYS [2] и может функционировать как совместно с ней так и самостоятельно. При совместной работе AGROTECH обеспечивает считывание из базы данных системы AGRSYS информации, относящейся к выбранному участку (характеристики химического и физического состава почвы), шкалирует их и заносит в свою БЗ.

Программа написана на языке Си (Microsoft QuickC 2.51, Windows for C 4.0) для IBM PC/AT-совместимых ПЭВМ с EGA-адаптером и функционирует в среде MS DOS.

С п и с о к л и т е р а т у р ы

1. Концепция информатизации общества (обобщенный вариант) // Вестн. всесоюз. общества информатики и вычисл. техники. - М: ВИМИ, 1990. - С. 6-32.

2. Морозенко О.А. Моделирование в сельском хозяйстве // Системный анализ и методы математического моделирования в экологии. - Киев: Ин-т кибернетики им. В.М. Глушкова АН УССР, 1990. - С. 83-87.

Получено 14.06.91

УДК 519.8

М.И. Железняк, Ю.И. Кузьменко, В.Э. Перчиков, П.В. Ткалич,
О.Г. Делец, О.А. Суздальцев, Н.В. Бука

ДНЕКС - СИСТЕМА ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ ПО УПРАВЛЕНИЮ ДНЕПРОВСКИМ КАСКАДОМ ВОДОХРАНИЛИЩ ПО ВОДОХОЗЯЙСТВЕННЫМ И РАДИОЛОГИЧЕСКИМ КРИТЕРИЯМ

Описан программный комплекс, объединяющий базы гидрологических, радиологических и гидрохимических данных о состоянии днепровского каскада водохранилищ, программы расчета миграции радионуклидов и процедуры оптимизации наполнения и сброски водохранилищ по водохозяйственным и экологическим критериям.

Программный комплекс ДНЕКС (Днепровский каскад) разработан в СКБ ММС Института кибернетики им. В.М. Глушкова АН УССР в 1990-1991 гг. Основная цель разработки заключалась в системном объединении созданных после Чернобыльской аварии программных реализаций камерных математических моделей миграции радионуклидов с базами данных (БД), графическими подсистемами на основе общей меню-управляемой оболочки. Такой "дружественный" интерфейс обеспечивает возможность работы с комплексом на ПЭВМ специалистам в области водного хозяйства и радиэкологии и облегчает профессиональным пользователям взаимодействие с программным комплексом. Система позволяет вести базы среднедекадных радиологических и гидрологических данных, подготавливать различные сценарии гидрологической ситуации в каскаде днепровских водохранилищ и сценарии воз-

ISBN 5-7702-0256-4 Компьютерные системы поддержки принятия решений в экологии. Киев, 1991.

возможной приточности радионуклидов в Киевское водохранилище, на их основе прогнозировать динамику радионуклидов в днепровском каскаде, рассчитывать оптимальные по различным критериям режимы работы водохранилищ. Программный комплекс "ДНЕКС-1.0" может быть использован не только для решения задач прогнозирования миграции радионуклидов, но и других токсичных примесей (тяжелых металлов, органических соединений и пр.) в каскаде днепровских водохранилищ и принятия решений по управлению каскадом по водохозяйственным и экологическим критериям.

Инструментальные средства, использованные при создании программного комплекса "ДНЕКС-1.0", включают в себя компиляторы языков C, Fortran, Clipper, интегрированный пакет для работы с окнами WFC и пакет прикладных программ DBS для задания функций манипулирования реляционно-организованными данными. Операционная система - MS DOS. Эксплуатация комплекса требует ПЭВМ PC XT/AT минимальной конфигурации.

Структура комплекса и назначение функциональных блоков.

"ДНЕКС-1.0" включает в свой состав несколько взаимосвязанных блоков обеспечивающих комплексное решение указанной задачи:

блок расчетов миграции радионуклидов в днепровском каскаде водохранилищ - "Прогноз";

блок расчетов режимов работы днепровских водохранилищ - "Оптимизация";

блок подготовки исходной информации - "Данные";

блок генерации локальной базы данных (ЛБД) для проведения расчетов - "Импорт";

блок графической обработки данных - "Графика".

меню - управляющая оболочка комплекса.

Блоки "Прогноз" и "Оптимизация" являются основными моделирующими блоками, реализующими численные методы решения задач прогноза миграции радионуклидов и расчета режимов работы каскада водохранилищ на планируемый период. Их функциональная особенность заключается в том, что блок "Прогноз", как правило, должен работать после блока "Оптимизация", так как в качестве исходных данных использует информацию об уровнях и объемах воды в водохранилищах на прогнозный период, рассчитываемую в блоке "Оптимизация". В каждом из моделирующих блоков

имеется редактор, обеспечивающий возможность корректировки информации в ЛБД для текущего расчета и просмотра результатов расчета, а также просмотра результатов работы блока в графическом режиме. Построенные в этом режиме графики можно вывести на печать в твердой копии средствами стандартного пакета GRAFER.

Блок "Данные" обеспечивает накопление, хранение и обновление среднедекадной информации, необходимой для работы моделирующих блоков, т.е. ведение глобальной базы данных (ГБД) для зафиксированной гидрографической структуры днепровского каскада, по фиксированным пунктам (створам, водпостам) наблюдений. ГБД включает три раздела: "Гидрография" - содержит постоянную информацию о конфигурации, бассейна и проектных характеристиках водохранилищ; "Измерения" - содержит хронологическую информацию о гидрометеорологических элементах водного баланса и радиоактивном загрязнении; "Аналоги" - содержит такую же информацию, что и раздел "Измерения", только за годы характерной водности.

Блок "Импорт" позволяет осуществить выборку данных из глобальной БД, необходимых для конкретного расчета (автоматически, в режиме диалога с пользователем) и поместить их в локальную базу данных (ЛБД), непосредственно с которой работают моделирующие блоки.

Блок "Графика" предназначен для наглядного отображения на схеме днепровского каскада результатов работы обоих моделирующих блоков одновременно по всем водохранилищам каскада на заданную дату.

Работа всех перечисленных блоков поддерживается управляющим меню (оболочкой), обеспечивающим их совместное функционирование и единообразие стиля работы в каждом блоке. Рассмотрим подробнее основные модели, положенные в основу расчетных блоков "Прогноз" и "Оптимизация".

Расчет миграции радионуклидов в каскаде водохранилищ основан на трехфазной камерной модели [1], описывающей динамику концентрации радионуклидов в растворе (C_1), на взвешях (C_1^a) и в донных отложениях водохранилищ (C_1^b). Модель прошла успешную проверку при прогнозировании миграции радионуклидов в днепровском каскаде водохранилищ после Чернобыльской аварии [1-3].

В рамках моделей такого типа каскад водохранилищ параметризуется системой резервуаров (камер, компартментов), причем состояние системы характеризуется осредненными по всей камере гидрологическими и радиологическими параметрами.

Модель включает пять обыкновенных дифференциальных уравнений, описывающих динамику основных водно-экологических характеристик в каскаде из N камер:

$$-\frac{dV_1}{dt} + Q_1 - Q_{1-1} = R_1 + \sum_{j=m}^n Q_j^t - Q_1^w; \quad (1)$$

$$\frac{dS_1}{dt} = \frac{1}{V_1} [Q_{1-1}S_{1-1} - Q_*S_1 + q_1^b - q_1^s] + R_1^s + \sum_{j=m}^n Q_j^t S_j; \quad (2)$$

$$\frac{dC_1}{dt} = - \left[\lambda + \frac{Q_*}{V_1} + \frac{K_d}{V_1} (A_{1,2} + A_{1,3}) \right] C_1 + \frac{1}{V_1} \left[\sum_{j=m}^n (Q_j C_j)^t + Q_{1-1} C_{1-1} + A_{1,2} C_1^s + A_{1,3} C_1^b \right]; \quad (3)$$

$$\frac{dC_1^s}{dt} = \frac{1}{V_1 S_1} \left\{ - [A_{1,2} + R_1^h + q_1^b + Q_{1-1} S_{1-1} + \sum_{j=m}^n (Q_j S_j)] C_1^s + Q_{1-1} S_{1-1} C_{1-1}^s + R_1^h C_1^h + q_1^b C_1^b + \sum_{j=m}^n (Q_j S_j C_j^s)^t + A_{1,2} K_d C_1 \right\}; \quad (4)$$

$$\frac{dC_1^b}{dt} = \frac{1}{M_1^b} [- (A_{1,3} + q_1^s + \lambda M_1^b) C_1^b + q_1^s C_1^s + A_{1,3} K_d C_1]; \quad (5)$$

где $Q_* = Q_{1-1} + R_1 + \sum_{j=m}^n Q_j^t$,

V_1 - объем камеры; Q_{1-1} - расход воды в нижнюю камеру; Q_{1-1} - расход воды, поступающей из верхней камеры; Q^t - расходы из $n(1)-m(1)+1$ притоков речной системы, впадающих в данную камеру; Q_1^w - суммарный расход воды на водозаборах; S_1 - средняя по объему камеры концентрация взвешенных наносов;

S_{i-1} - концентрация взвеси, поступающей из верхней камеры;
 R^h - приток взвеси за счет переработки берегов; S_j^t -
концентрация в притоках; q_1^b, q_1^s - средние по камере потоки
взмучивания и седиментации.

Уравнения модели содержат также ряд коэффициентов: $\lambda =$
 $= \ln 2 / T_*$, где T_* - период полураспада; K_d - коэффициент
равновесного распределения для системы взвесь-вода; $A_{1,3}$ и
 $A_{1,2}$ - коэффициенты межфазного обмена, в соответствии с
общими положениями химической кинетики должны быть пропор-
циональны эффективным массам взаимодействующих в сорбционных
процессах веществ и обратно пропорциональны характерным вре-
менам сорбции (десорбции) и учитывать направленность сорб-
ционных процессов.

Система уравнений (1)-(5) решается методом Рунге-Кутты.

При подготовке сезонных прогнозов исходные гидроло-
гические и радиологические данные задаются с декадным
осреднением. Гидрологические данные на период весеннего по-
ловодья задаются с учетом прогнозов Укргидромета по максимуму
и объему притока к водохранилищам в период половодья. Вре-
менная развертка этих интегральных оценок обычно проводится с
использованием данных по гидрологическим годам-аналогам.
Прогноз притока радионуклидов из Припяти и Днестра осущест-
вляется по результатам моделирования смыва с водосборов. При
проведении расчетов на прогностический период наряду с
данными об ожидаемой приточности к водохранилищам и об
остальных составляющих водного баланса необходимо задавать
режим наполнения и сработки водохранилищ, т. е. определять
ход уровней в верхнем бьефе водохранилищ Н. Динамика уровней
определяет изменение объема dV/dt в уравнении (1).

Оптимизация проводится на основе модели, обеспечивающей
выбор наиболее предпочтительных вариантов режимов работы
водохранилищ в рамках требований, предъявляемых специальной
Межведомственной комиссией и правилами эксплуатации гидро-
узлов. Для этого отыскивалось решение последовательности
оптимизационных задач, рассматриваемых для каждого из водо-
хранилищ в следующей постановке [2].

Обозначим ζ_m заданные на прогностич. период, насчитыва-
ющий M интервалов времени, векторы возмущающих воздействий,

включающие элементы водного баланса (осадки, испарение, приточность, водопотребление и пр.) и концентрации радионуклидов, поступающих в водохранилище с притоком. Тогда задача определения режима работы каждого из водохранилищ для заданных на начальный момент времени H_0 и G_0 сводится к определению расходов Q_m , уровней H_m и концентраций C_m ($m=\overline{1, M}$), минимизирующих функцию цели

$$F(H, C, Q, \zeta) \rightarrow \min, \quad (6)$$

меньшему значению которой соответствует лучшая ситуация с точки зрения лица, принимающего решения. При этом выполняются ограничения

$$G_j(H, Q, \zeta) < 0, \quad j=\overline{1, J}, \quad (7)$$

где J - число функций G_j для данного водохранилища.

Ограничения (7) обеспечивают соблюдение условий водного баланса с учетом водозаборов потребляющих отраслей народного хозяйства и гидрометеорологических составляющих (включая основную и боковую приточность, осадки и испарение), а также выполнение требований безопасности гидросооружений, эколого-санитарных, предотвращения холостых сбросов помимо турбин ГЭС, обеспечения глубин судового хода и т.п. Целевая функция (6) может быть представлена в виде

$$F(H, C, Q, \zeta) = \sum_{k=1}^K p_k f_k, \quad (8)$$

где f_k - критерии оптимальности, учитывающие цели регулирования стока; p_k - положительные коэффициенты важности составляющих целевой функции, позволяющие менять ее структуру, K - число критериев f_k . Используемый нами набор f_k имеет следующий вид:

$f_1 = \max(Q_m)$ - для срезки пика половодья;

$f_2 = \sum (H_m - \hat{H}_m)^2$ - для получения режима, максимально приближенного к желаемому (наперед заданному в виде \hat{H}_m);

$f_3 = \sum (Q_m - Q_{m-1})^2$ - для обеспечения наиболее равномерной сработки водохранилища, нормальных условий на нерестилищах и предотвращения резких колебаний уровней воды в нижнем бьефе;

$f_4 = \sum Q_m^2$ - для удержания воды в водохранилище или срезки пика половодья;

$i_{\Sigma} = \max (C_{ij})$ - обеспечивает максимальное снижение пиковой концентрации заданного j -го загрязнителя.

Оптимизационная задача решается последовательно для каждого из водохранилищ каскада в диалоговом режиме, который обеспечивает возможность корректировки критериев управления и ограничений на режимные переменные в соответствии с "Правилами эксплуатации" на всех этапах решения задачи. Результаты расчета выводятся на дисплей в табличной и графической формах и записываются в файл.

Описанный метод успешно применялся для прогнозирования радиационного состояния днепровского каскада водохранилищ в 1987-1991 гг [3]. Рассмотрим пример расчета миграции в каскаде наиболее критичного радионуклида - стронция-90. Как показали результаты расчетов смыва радионуклидов с поймы реки Припять, наиболее критичными являются паводки 25%-й обеспеченности, при которых разбавление смываемых с поймы

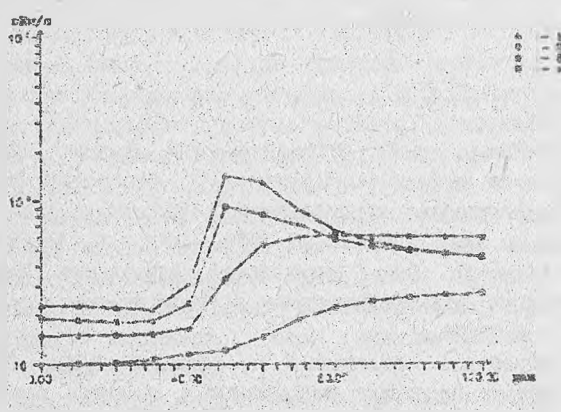


Рисунок. Концентрация стронция-90 в водохранилищах днепровского каскада в период модельного паводка 25%-й обеспеченности (отчет дней в сутках от I марта): 1 - Киевское, 2 - Каневское, 3 - Кременчугское, 4 - Каховское

радионуклидов происходит в относительно небольших по сравнению с паводками более редкой повторяемости объемах воды. Результаты соответствующих расчетов представлены на рисунке. При этом суммарное поступление стронция-90 в Киевское водохранилище за паводок, складывающееся из 460 Ки за счет поверхностного смыва с территории бассейна в пределах 30-километровой зоны и 900 Ки за счет поймы, составило $G=1360$ Ки. Максимальная среднедекадная концентрация стронция в Припяти задавалась на уровне 400 пКи/л. Из графиков, представленных на рисунке, видно, что в этом случае в приплотинной части Киевского водохранилища (Вышгород), где расположены городские водозаборы, возможно превышение существующего норматива ВДУ (временно допустимых норм), равного 100 пКи/л для стронция-90, в полтора раза. Ведущееся в настоящее время строительство дамбы на левом берегу Припяти позволит изолировать наиболее загрязненную часть поймы от затопления в периоды прохождения паводков и полностью исключит вероятность превышения норматива ВДУ в будущем.

С п и с о к л и т е р а т у р ы

1. Железняк М.И. Математические модели миграции радионуклидов в каскаде водохранилищ // Системный анализ и методы математического моделирования в экологии. - Киев: Ин-т кибернетики им. В.М. Глушкова АН УССР, 1990. - С. 48-58.
 2. Кузьменко Ю.И. Оптимальное управление каскадом водохранилищ по водохозяйственным и экологическим критериям // Там же. - С. 73-78.
 3. Морозов А.А., Железняк М.И., Митаслов В.М., Тилофеев А.Б. Система поддержки коллективного принятия решений в области охраны вод на базе центра ситуационного управления // Исследование процедур поддержки принятия решений в автоматизированных системах. - Киев: Ин-т кибернетики им. В.М. Глушкова АН УССР, 1989. - С. 51-58.
- Получено 14.06.91

УДК 519.682.9 : 519.8

Н.Я. Виток, М.И. Железняк, П.В. Ткалич,

Н.Н. Дзюба, Е.В. Ткалич

РИВТОКС - ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС МОДЕЛИРОВАНИЯ МИГРАЦИИ ЗАГРЯЗНЯЮЩИХ ВЕЩЕСТВ В РАЗВЕТВЛЕННОЙ СЕТИ РЕЧНЫХ РУСЕЛ

Описан ориентированный на персональные ЭВМ программный комплекс, предназначенный для расчетов гидравлических режимов и переноса примесей в речной сети. Программный комплекс позволяет рассчитывать миграцию растворимых и сорбируемых на взвешах загрязнений от системы источников в стационарных режимах течения и на фоне паводочных волн и волн попуска в речной сети.

Введение. Технологические аварии последних лет, вызвавшие загрязнение крупных речных систем, высветили актуальность разработки систем эффективного оперативного прогнозирования последствий штатных и аварийных выбросов токсических веществ в речную сеть из технологических систем.

В СКБ ММС Института кибернетики имени В.М. Глушкова АН УССР целенаправленные работы по созданию программных средств и математических моделей, описывающих гидродинамический режим и перенос токсических примесей в реках, произошли с момента аварии на Чернобыльской АЭС, применительно к моделированию распространения радионуклидов в русловой сети р. Припять. Разрабатываемый программный комплекс РИВТОКС применялся также для моделирования миграции в реках различных типов загрязнений в связи с прогнозированием последствий аварийных сбросов и анализом размещения новых технологических систем. Описание структуры комплекса, его функционального наполнения представлены в статье.

Назначение и структура. Программный комплекс РИВТОКС для ПЭВМ IBM PC / AT может быть использован в следующих областях:

экологическая экспертиза размещения опасных производств на водосборах рек;

оценка последствий технологических и аварийных выбросов токсических веществ в русловую сеть;

оптимизация технологических сбросов в зависимости от

ISBN 5-7702-0256-4 Компьютерные системы поддержки принятия решений в экологии. Киев, 1991.

гидрологических режимов реки;

расчет нестационарных гидравлических режимов в разветвленной сети речных русел.

РИВТОКС включает математические модели, описывающие усредненные по сечению русла параметры следующих процессов:

стационарные и нестационарные течения в русловых сетях произвольной конфигурации;

транспорт взвешенных наносов;

миграция и трансформация токсических веществ в растворе, на взвешках и в донных отложениях.

Меню - управляемый интерфейс обеспечивает взаимодействие вычислительных программ с графической подсистемой и локальной базой данных, позволяет мобильно перестраивать входные данные под различные конфигурации речных сетей. Отдельные подсистемы, аналогичные блокам РИВТОКСа, реализованы в [1-5], однако РИВТОКС характеризуется комплексностью охвата всех перечисленных процессов.

Моделирование гидравлических процессов. Для расчета полей течений в разветвленных речных руслах использовались уравнения Сен-Венана, которые связывают усредненные по площади поперечного сечения реки характеристики течений в открытых руслах. При разработке программного комплекса РИВТОКС в качестве таких характеристик потоков были выбраны значения отметок уровня свободной поверхности $y(x, t)$ и расхода жидкости по рукавам русловой сети $Q(x, t)$. Запишем уравнения модели:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial y}{\partial t} + \frac{1}{b} \frac{\partial Q}{\partial x} = 0, \end{array} \right. \quad (1)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Q^2}{A} \right) + gA \frac{\partial y}{\partial x} + gA \frac{Q|Q|}{K^2} = 0 \end{array} \right. \quad (2)$$

при начальных

$$\left\{ \begin{array}{l} Q(x, 0) = Q_0(x), \\ y(x, 0) = y_0(x) \end{array} \right. \quad (3)$$

и граничных условиях

$$\left\{ \begin{array}{l} Q_{out} = Q_{out}(t), \\ y_{in} = y_{in}(t) \end{array} \right. \quad \text{либо} \quad \left\{ \begin{array}{l} Q_{in} = Q_{in}(t), \\ y_{out} = y_{out}(t), \end{array} \right. \quad (4)$$

где x - физическая координата, отсчитываемая вдоль русла,

этот метод на случай многорукавных русловых сетей сложной конфигурации и связей (обтекание островов, ветвление участков реки и т.д.) [2,3]. Граничные условия в узлах ветвления сети были выбраны как условия равенства отметок уровней свободной поверхности относительно каждой из ветвей, примыкающих к узлу при одновременном поддержании баланса расхода в этом же узле.

Эти простые условия позволили заменить задачу расчета гидравлических режимов сложных русловых сетей на задачу расчета таких режимов по каждому рукаву сети в отдельности и тем самым распараллелить алгоритм их вычисления.

Моделирование переноса взвесей и примесей. Качество воды в реках, подверженных действию сбросов из промышленных и агротехнических систем, чаще всего прогнозируется на основе упрощенных аналитических методов [4], при разработке которых применяются допущения, существенно схематизирующие гидравлические и гидрохимические процессы в природных водотоках.

Одна из центральных задач математического моделирования качества вод - выбор масштабов детализации описываемых гидравлических и гидрохимических процессов, адекватных исходной информации и задачам исследований. Опыт моделирования речных систем [2,3,5] показывает, что на расстояниях от места сброса, превышающих длину полного перемешивания в русле, процесс транспорта загрязнений может быть с достаточной точностью описан уравнениями одномерной русловой модели. В этом случае уравнения модели оперируют переменными, осредненными по поперечному сечению русла.

Для описания качества воды в речных руслах в рамках этого подхода уравнение динамики растворенной многокомпонентной (многофазной) примеси запишем в общем виде

$$\frac{\partial (AC_1)}{\partial t} + \frac{\partial (QC_1)}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} (AE \frac{\partial C_1}{\partial x}) + R_1(C_1), \quad (5)$$

где $C_1(x,t)$ - средняя по сечению концентрация 1-й компоненты (фазы); $E=E(x,t)$ - коэффициент продольной дисперсии; R_1 - функция, описывающая источниковые и физико-химические процессы 1-й компоненты примеси.

Для определения E выбрана модель Елдера [2,6], хорошо зарекомендовавшая себя в разнообразных гидрологических условиях

$$E = 5.93 U_* h, \quad U_* = \sqrt{g} U / C_{\text{ш}}$$

где U_x - сдвиговая (динамическая) скорость; $U = Q/A$ - скорость потока; $h(x)$ - глубина русла; $C_{ш}$ - коэффициент Шези, который определим по формуле Маннинга.

Если A , Q , E - постоянны, то аналитическое решение (5) является распределением Гаусса

$$C_1(x, t) = \frac{C_{10} V_{10}}{2A(\pi Et)^{1/2}} \exp\left[-\frac{(x - \frac{Qt}{A})^2}{4Et}\right] + \frac{t}{A} R_1(C_j), \quad (6)$$

где C_{10} и V_{10} - концентрация и объем обрасываемого вещества.

Большинство рекомендованных для оперативного прогнозирования загрязненности рек соотношений основаны на соотношениях типа (6) [4], что пригодно лишь для приближенных оценок, так как A , Q , E чаще всего переменны вдоль русла. Поэтому для более точного прогнозирования распространения примеси следует решать уравнение (5).

Рассмотрим несколько примеров реализации модели (5) для различных типов загрязнений.

Радионуклиды. К особенностям транспорта большинства радионуклидов следует отнести интенсивный обмен загрязненными между водой, взвешенными наносами и донными отложениями. Поступающие в реку частицы илистой и песчаной взвеси, участвуя в адсорбционном обмене с растворимыми формами радионуклидов, изменяют соотношение загрязнений между фазами также и в результате чисто гидравлических процессов седиментации и взмучивания донных отложений. Процессы межфазного обмена радионуклидов осложняются особенностями физико-химического состояния частиц, поступающих в гидрографическую сеть на различном удалении от ЧАЭС. Поэтому моделирование миграции радионуклидов требует эффективного описания транспорта наносов (соответственно процессов седиментации и взмучивания) и межфазных обменов радионуклидами, находящимися в растворенной форме, на взвесах и в донных отложениях. Блок расчета переноса радиоактивных загрязнений РИВТОКСа включает, соответственно, решение уравнений динамики средних по сечению концентрации радионуклидов в растворенной форме C , на взвесах C^s и в слое Z_* донных отложений C^b , а также уравнения транспорта взвешенных наносов S . Уравнения модели могут быть получены интегрированием по сечению русла уравнений трехмерной модели [6]:

$$\frac{\partial (bhS)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(SQ) = \frac{\partial}{\partial x} (hbE \frac{\partial S}{\partial x}) + bW_O(S_* - S),$$

$$\frac{\partial (bhC)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(QC) = \frac{\partial}{\partial x} (Ebh \frac{\partial C}{\partial x}) - \lambda b h C - a_{1,2} b S (K_d C - C^s) - a_{1,3} b (K_d C - C^b),$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (h b C^s S) + \frac{\partial}{\partial x} (Q S C^s) = \frac{\partial}{\partial x} (E b h \frac{\partial}{\partial x} (S C^s)) - \lambda h b S C^s + a_{1,2} S b (K_d C - C^s) + b C^b q^b - b C^s q^s,$$

$$\rho(1-\varepsilon) \frac{\partial}{\partial t} (b Z_* C^b) = a_{1,3} b (K_d C - C^b) - b C^b q^b + b C^s q^s,$$

где B - отношение придонной концентрации взвеси к средней по глубине концентрации; $a_{1,2}$ - скорость обмена вода - взвесь; $a_{1,3}$ - скорость обмена вода - дно; K_d - коэффициент равновесного распределения для системы "взвесь - вода". При такой параметризации сорбционных процессов можно учесть влияние физико - химических характеристик воды и взвесей на интенсивность сорбции, задав соответствующие зависимости для K_d .

Для расчета средней по глубине равновесной концентрации взвеси S_* использовалась формула Бийкера [6], прошедшая успешную проверку для различных водных объектов.

Изменение толщины слоя донных отложений Z_* описывается уравнением донных деформаций

$$(1-\varepsilon) \frac{\partial Z_*}{\partial t} = q^s - q^b,$$

где вертикальные потоки взвеси определяются так:

$$q^s = \begin{cases} Bw_O(S - S_*) & \text{при } S > S_* \\ 0 & \text{при } S < S_* \end{cases}, \quad q^b = \begin{cases} Bw_O(S - S_*) & \text{при } S < S_* \\ 0 & \text{при } S > S_* \end{cases}.$$

Для реализации модели по экспериментальным данным идентифицируются параметры $a_{1,2}$, $a_{1,3}$ и K_d .

Интегральные показатели органического загрязнения БПК-РК.
В предположении, что реакции распада - это реакции первого порядка с постоянными коэффициентами [5], взаимодействие РК (растворенного кислорода) с БПК (биохимическим потреблением кислорода) можно представить в виде следующего обменного блока (источники - стоки) уравнений (5):

$$\frac{\partial C_1}{\partial t} = -k C_1.$$

$$\frac{\partial C_2}{\partial t} = -k_1 C_1 + k_2 (C_{n1} - C_2) + S - (P - L),$$

где C_1 - концентрация БПК; C_2 - концентрация растворенного кислорода; k - коэффициент окисления БПК; k_2 - коэффициент реаэрации; C_{n1} - равновесная концентрация кислорода; S - потребление кислорода в результате процесса седиментации; P - продуцирование кислорода за счет фотосинтетической активности водорослей; L - потребление кислорода в результате дыхания водорослей. В этих уравнениях опущены члены адвективного и дисперсионного переноса.

Примеси, описываемые реакциями первого порядка. Для многих типов токсичных примесей достаточно эффективное для инженерных приложений описание физико-химических превращений может быть достигнуто простыми реакциями первого порядка. Данные о коэффициентах распада широкого круга токсических веществ представлены в [7]. Коэффициенты уточняются по данным калибровки модели на конкретном объекте.

Тяжелые металлы. Одна из наиболее сложных задач в прогнозировании переноса примесей в речных системах связана с тяжелыми металлами, для большинства которых характерно, как и для радионуклидов, активное взаимодействие со взвесями и донными отложениями. Однако значительно большую роль, чем для критичных радионуклидов, для этих примесей играют процессы гидролиза и комплексообразования, приводящие к разнообразию форм нахождения металлов в пресных водах. Для описания этих процессов в западных странах широко используется гидрохимическая модель MENTEQ [1], сопряжение которой с переносными блоками РИВТОКСа является первоочередной задачей дальнейших исследований.

Численная реализация уравнений адвективно-диффузионного переноса. Метод расщепления по времени позволяет на каждом временном шаге проводить вычисления поочередно для всех рассматриваемых физических явлений: адвекции, диффузии и физико-химического обмена. В РИВТОКСе используется двухточечная "против потока" конечно - разностная компактная схема четвертого порядка, построенная с применением метода характеристик и кубической сплайн-интерполяции, для адвективного шага расщепления, и схема второго порядка для диффузионного шага [8]

$$C_1^{n+1} = \Phi_1^n(F), \quad \left(\frac{\partial C}{\partial x}\right)_1^{n+1} = \Phi_1^n\left(\frac{\partial C}{\partial x}(F)\right),$$

где оператор $\Phi_1^n(F)$ имеет следующий вид:

$$\Phi_1^n(F) = \sum_{k=0,1} C_1^n \cdot f_{2-k} + \sum_{k=0,1} \left(\frac{\partial C}{\partial X} \right)_1^n \cdot f_{4-k}.$$

а (весовая) вектор-функция F определяется выражением

$$F \equiv (f_p + dt E \frac{\partial^2}{\partial X \partial X} f_p), \quad p=1,4,$$

$$\begin{aligned} f_1(\gamma) &= \gamma^2(3-2\gamma), & f_2(\gamma) &= 1-f_1(\gamma), \\ f_3(\gamma) &= \gamma^2(1-\gamma) dx \operatorname{sign}(U), & f_4(\gamma) &= -\gamma(1-\gamma)^2 dx \operatorname{sign}(U), \\ \gamma &= (x'-x)/dx. \end{aligned}$$

Тестирование предложенного алгоритма показало высокую точность численной схемы решения уравнения адвективно-диффузионного переноса [8].

Для решения системы уравнений, описывающих физико-химические процессы, использовалась неявная схема.

Программное обеспечение комплекса. РИВТОКС объединяется меню-управляемой оболочкой с графическим редактором русловой сети. Локальная база данных, гидрологический блок и блок переноса примеси формируются и запускаются через удобный интерфейс с интерактивной графикой.

Примеры практического использования комплекса. РИВТОКС применялся для моделирования радиационного загрязнения р. Припять и химического загрязнения ряда крупных рек - Десны, Даугавы, Северского Донца. Для р. Припять решалась задача расчета распределения расходов в русловой сети возле Чернобыльской АЭС. Оценивалось влияние модификаций речной сети, проводимых в рамках водохранимых мероприятий на миграцию радионуклидов.

Примером использования программного комплекса при оценке последствий химических аварий является моделирование загрязнения р. Десна в июле-августе 1990 г. В результате аварии на Ивотском стекольном заводе произошел залповый сброс в р. Ятка (приток р. Десны) 16 т фенола и 4С т формальдегида, в результате которого концентрация формальдегида у г. Брянска (150 км ниже места сброса) через четыре дня превысила ПДК в три раза. С использованием РИВТОКС был составлен прогноз, из которого следовало, что пик загрязнения достигнет г. Киева еще через 14 суток и составит 10^{-3} ПДК. Эти результаты затем были подтверждены прямыми измерениями.

Список литературы

1. Allison J.D., Brown D.S., Novo-Gradac K. J.. MINTEQA2 - PRODEFAC2, A Geochemical Assessment Model for Environmental Systems: Res. Laboratory. Office of Research and Development U.S. Environmental Protection Agency. - Athens (Georgia), 1991. - 96 p.
 2. Кожан Е.А., Колли Ф.М., Вердей А. Численные методы в задачах речной гидравлики. - М.: Энергоатомиздат, 1985. - 256 с.
 3. Рогуневич В.П. Автоматизация математического моделирования движения воды и примесей в системах водотоков. - Л.: Гидрометеиздат, 1989. - 264 с.
 4. Методические основы оценки и регламентирования антропогенного влияния на качество поверхностных вод / Под ред. А.В. Караульова. - Л.: Гидрометеиздат, 1987. - 287 с.
 5. Orlob G.T. Mathematical Modeling of Water Quality: Streams, Lakes and Reservoirs. - Chichester: Wiley, 1983. - 519 p.
 6. Железняк Н.И. Математические модели миграции радионуклидов в каскаде водохранилищ // Системный анализ и методы математического моделирования в экологии. - Киев: Ин-т кибернетики им. В.М.Глушкова АН УССР, 1990. - С. 48-58.
 7. Пасль Л.Л. Основы прогнозирования качества поверхностных вод. - М.: Наука, 1982. - 182 с.
 8. Ткалич П.В. Численное моделирование распространения растворенной примеси в водоемах // Системный анализ и методы математического моделирования в экологии. - Киев: Ин-т кибернетики им. В.М.Глушкова АН УССР, 1990. - С. 62-67.
- Получено 24.06.91

УДК 519.862.2:519.711.3

П.П. Трохимчук

ОСНОВЫ ТЕОРИИ ОПТИМАЛЬНЫХ СОЦИАЛЬНО-ЭКОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Излагается теория оптимальных социально-экологических систем, построенная согласно концепции теории вострактных сопряженных систем. Предлагаемый подход позволяет компактно записывать модели сложных социально-экологических систем и устанавливать для них соответствующие законы.

ISBN 5-7702-0256-4 Компьютерные системы поддержки принятия решений в экологии. Киев, 1991.

В основу предлагаемой работы положим концепцию сопряженных систем, которая разрабатывалась автором на протяжении последних семи лет [1,2], в контексте ее применения к социально-экологическим задачам. Следует отметить, что применение тех или иных системных подходов для анализа этих задач актуально [3,4].

Основу сопряженной теории систем составляет положение об эквивалентности (равносправии) таких системных параметров, как вход-выход, параметр-функция и т.п., а также системные законы:

закон композиции - критерий взаимности [2];

критерий оптимального построения и регулирования системы - принцип наименьшей комбинаторной числимости.

Следует отметить, что на целесообразность построения теории систем с эквивалентным входом-выходом указывает А.Г. Ивахненко [5].

Сопряженный подход в теории систем является синтезом двух основных направлений ее развития (структуралистского и аксиоматического) [6,7].

В экономике и экологии большую роль играют законы устойчивости, равновесия и роста [3]. Однако теорий, которые могли бы связать воедино эти факторы, мало. До сих пор, например, нет теорий, которые могли бы дать прогнозы развития и устойчивости больших социально-экономических систем, таких, как наша страна, мировое сообщество в целом или единая социально-экологическая система Чернобыльской зоны.

Для решения таких задач целесообразно применить подход сопряженной теории систем. Синтез вышперечисленных социально-экологических задач и теории абстрактных сопряженных систем составляет основу теории оптимальных социально-экологических систем. В отличие от теории абстрактных сопряженных систем в предлагаемой теории вначале постулируется конкретный конструктив.

Перейдем к изложению основных результатов. В отличие от работы [3], где основным положением является усиление, углубление и расширение внутренних, горизонтальных и вертикальных связей, в данной работе основным будет применение метода абстрактных сопряженных систем для социально-экологических задач, где равноправны не только вход и выход, но и горизонтальные, вертикальные и внутренние связи.

Согласно идеологии абстрактных сопряженных систем [2] и эконометрики [8], введем аддитивные параметры: x_i - количество выпускаемой продукции, в том числе и экологическое оборудование; c_i - спрос на продукцию; $\sum x_{ij}$ - затраты на всю продукцию [8]; и мультипликативные: k_i - количественное число; b_i - число спроса; y_{ij} - затратное число. Под количеством, затратами и спросом подразумеваются обобщенные параметры, т.е. затраты и спрос могут иметь экономический, экологический, психологический, а также иной смысл.

Мультипликативные обратные, параметры согласно работам [1,2], вводятся следующим образом:

$$k_i = N_1/x_i; b_i = N_2/c_i; y_{ij} = N_3/x_{ij}, \quad (1)$$

где N_i - коэффициенты.

Обобщенные эконометрические параметры имеют вид.

$$K_{ij} = k_i x_j; B_{ij} = b_i c_j; Y_{ij} = x_{ij} y_{ij}. \quad (2)$$

Таким образом,

$$Z_{ij} = \begin{cases} N_j; i=j; i=1,2,3; \\ f_i(r_i; p_j), \end{cases} \quad (3)$$

где $r_i = k_i, b_i, y_{ij}; p_j = x_j, c_j, x_{ij}; Z_{ij} = K_{ij}, B_{ij}, Y_{ij}; f$ - функциональная зависимость.

Обобщенное уравнение соответствующего социально-экологического процесса можно записать в виде

$$f(K_{ij}) = f_1(Y_{ij}) + f_2(B_{ij}), \quad (4)$$

где f - функциональная зависимость.

В линейном случае

$$K_{ij} = Y_{ij} + B_{ij}, \quad (5)$$

или

$$k_i x_j = x_{ij} y_{ij} + b_i c_j. \quad (5a)$$

При $i=j$ имеем

$$kx = \tilde{x}y + bc,$$

где $\tilde{x} = x_{ij}$. Минимизируя (6), получим

$$\frac{\partial x}{\partial y} = \frac{\partial \tilde{x}}{\partial k} = A_1; \frac{\partial k}{\partial b} = \frac{\partial c}{\partial x} = A_2; \frac{\partial x}{\partial b} = -\frac{\partial c}{\partial y} = A_3. \quad (7)$$

Решая эти уравнения, получаем

$$\begin{aligned} x &= x_0 + A_1 y; \quad k = k_0 + A_2 b; \quad \bar{x} = \bar{x}_0 + A_3 b; \\ \bar{x} &= \bar{x}_0 + A_1 k; \quad c = c_0 + A_2 k; \quad c = c_0 - A_3 y. \end{aligned}$$

Таким образом, имеем линейные законы сохранения количеств затрат, спроса и обратносвязных величин. Соотношения (8) являются обобщением основных законов равновесной эконометрии (законы Хикса и принципы Ле Шателье-Самуэльсона [8]). Как видим, используя результаты сопряженной теории инвариантов можно выводить законы для любой системы, т.е. в отличие традиционной эконометрии можно включать в рассмотрение различные факторы, в том числе информационные, экологические и т.п.

В общем виде, согласно [2], соотношения (4), (5) можно представить следующим образом:

$$\begin{aligned} A_1^1 \dots A_r^s \bar{A}_1^1 \dots \bar{A}_r^q \quad O_k^l \quad \bar{O}_p^q \quad K_{i,j} = {}_1 A_1^1 \dots {}_1 A_r^s \quad {}_1 \bar{A}_1^1 \dots {}_1 \bar{A}_r^q \quad {}_1 O_k^l \quad {}_1 \bar{O}_p^q \quad Y \\ + {}_2 A_1^1 \dots {}_2 A_r^s \quad {}_2 \bar{A}_1^1 \dots {}_2 \bar{A}_r^q \quad {}_2 O_k^l \quad {}_2 \bar{O}_p^q \quad B_{i,j}, \end{aligned}$$

где A_i^j , \bar{A}_i^j - прямые и обратные качественные, а O_k^l , \bar{O}_p^q - количественные преобразования (алгебры) соответственно. Количественными преобразованиями в данном случае подразумеваются преобразования, которые увеличивают или уменьшают соответствующую математическую величину на значение, кратное мере. Под качественными подразумеваются преобразования, которые изменяют соответствующий математический конструктив с изменением размерности по соответствующему параметру и действуют на прямую или обратную части.

В связи с этим по-иному ставится вопрос и о горизонтальных и вертикальных уровнях в такой теории систем. Вертикальным уровням по смысловому значению соответствуют различные члены квадратичных форм в соотношениях (4), (5). Горизонтальными уровнями в данном случае будут соответствующие экономические, экологические, лингвистические системы. Соответствующие преобразования (качественные и количественные) позволяют устанавливать целый набор горизонтальных, вертикальных, смешанных уровней. В данном случае количественные преобразования будут соответствовать горизонтальным уровням, а качественные - вертикальным и смешанным.

Таким образом, сведение основных уравнений к безразмерному виду (4), (5) позволяет свести в единую плоскость раз-

качественные параметры. Строго говоря, понятие горизонтальных и вертикальных уровней здесь довольно относительно из-за равноправия алгебр и преобразований, входа и выхода и т.д.

К недостаткам предлагаемого подхода необходимо отнести трудности, связанные с выбором соответствующих параметров, функций и преобразований. Однако этот подход является более общим по сравнению с традиционным и позволяет описать более широкий круг проблем и задач.

С п и с о к л и т е р а т у р ы

1. *Тролячун П.П.* Противоречия в современной физической теории. Метод диффеоморфно-сопряженных форм и некоторые его применения. - Свердловск, 1985. - 41 с. - (Препр./УНЦ АН СССР).

2. *Тролячун П.П.* Теория абстрактных сопряженных систем. - Винница, 1990. - 6 с. Деп. в УкрНИИТИ 05.06.90, N 1724-Укр90. РЖ Математика 2Г303, 1991.

3. *Морозов А.А., Чепурной Н.Д.* Проблемы создания многоуровневых систем поддержки принятия решений в современных эколого-экономических системах // Системный анализ и методы математического моделирования в экологии. - Киев: Ин-т кибернетики им. В.М.Глушкова АН УССР, 1990. - С. 4-15.

4. *Моисеев Н.Н.* Кибернетическое описание экологических систем/Кибернетика.- 1977.- N 6.- С. 132-145.

5. *Иваниценко А.Г.* Непрерывность и дискретность. - Киев: Наук. думка, 1990. - 174 с.

6. *Куленико А.И.* Кибернетика и фундаментальные науки. - Киев: Наук. думка, 1987. - 212 с.

7. *Клир Дж.* Системология. Автоматизация решения системных задач.- М.: Радио и связь, 1990. - 544 с.

8. *Моршляк М.* Равновесие, устойчивость, рост. - М.: Наука, 1972. - 279 с.

Получено 14.06.91

Заключение. В сборнике представлены новые результаты исследования проблем, связанных с задачами ликвидации последствий аварии на Чернобыльской АЭС и с экологическими задачами в целом. Выполненные работы могут быть использованы при построении систем поддержки принятия решений в экологии на различных территориальных уровнях: национальном, региональном и локальном.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	3
Чепурной Н.Д., Бука Н.Н., Чабанюк В.С. Об одной общей концепции построения республиканской экологической системы поддержки принятия решений.....	3
Малюков В.П., Линдер Н.В. Игровой подход в эколого-экономическом моделировании.....	17
Грищенко А.И. Информационная картографическая система как часть информационной системы мониторинга окружающей среды.....	24
Вилли А.Н., Екимович Н.А., Пашко С.В., Черная Ж.А. Моделирование миграции тяжелых металлов в пресноводных системах	29
Лысенко Г.Б. Моделирование миграции радионуклидов с поверхностным стоком.....	36
Сляков В.Н. Определение вероятностных характеристик величин измерения в радиэкологическом мониторинге с помощью экспертной системы.....	42
Соколов А.И., Попов И.А. АGROTECH - экспертная система с пополняемой БЗ для интенсивных технологий в растениеводстве.....	50
Железняк М.И., Кузьменко Ю.И., Перчиков В.Э., Ткалич П.В., Делец О.Г., Суздальцев О.А., Бука Н.В. ДНЕКС - система поддержки принятия решений по управлению днепровским каскадом водохранилищ по водохозяйственным и радиологическим критериям.....	55
Витюк Н.Я., Железняк М.И., Ткалич П.В., Дажба Н.Н., Ткалич Е.В. РИВТОКС - программный комплекс моделирования миграции загрязняющих веществ в разветвленной сети речных русел.....	63
Трохимчук П.П. Основы теории оптимальных социально-экологических систем.....	71
Заключение.....	75

Научное издание

КОМПЬЮТЕРНЫЕ СИСТЕМЫ ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ
РЕШЕНИЙ В ЭКОЛОГИИ

Сборник научных трудов

Редактор В. А. Кошечая

Корректор Н. Е. Карпенко

Доп. пл.

Подп. в печ. 03.09.91. Формат 60×84/16. Бум. тип. №2. Офс. печ. Усл.
печ. л. 4,42. Усл. кр.-отт. 4,66. Уч.-изд. л. 5,0. Тираж 350 экз. Заказ 1429.
Цена 1 р.

Редакционно-издательский отдел с полиграфическим участком
Института кибернетики имени В. М. Глушкова АН УССР
252207 Киев 207, проспект Академика Глушкова, 40