

ЭКСПЕРТНАЯ СИСТЕМА ЭКОЛОГИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ БАСЕЙНА КРУПНОЙ РЕКИ

© 2003 Н.В. Костина, Г.С. Розенберг, В.К. Шитиков

¹ Институт экологии Волжского бассейна РАН, г. Тольятти

Обсуждается концепция построения экологической экспертной системы. Рассмотрены структура экспертной системы "REGION" и ее применение для исследования эколого-экономических систем Волжского бассейна.

Как уже отмечалось ранее [1], в самом общем виде любая экспертная система должна состоять из базы данных предметной области (БД), базы знаний (БЗ – Knowledge Base of Ecology), программы «решателя проблем» (ПРП), области запросов (ОЗ) и еще ряда специфических обслуживающих программ. «Под экспертной системой понимается система, объединяющая возможности компьютера со знаниями и опытом эксперта в такой форме, что система может предложить *разумный совет* или осуществить *разумное решение* поставленной задачи» (*выделено автором цитаты. – Реплика наша; [2; с. 9]*).

Развитие представлений о средствах и способах решения информационных задач привели к появлению геоинформационных (ГИС) и экоинформационных систем (ЭИС), которые обеспечивают хранение и оперативный доступ к совокупности данных и знаний о экосистемах, о взаимодействии природы и общества. Такие системы предназначены как для решения задач рационального природопользования в регионе, так и для обеспечения разнообразной экологической информацией всевозможных потребителей. Поэтому очень важно на этапе формирования массивов информации обеспечить их унификацию. Это позволит создавать ГИС и ЭИС не только для отдельных административно-территориальных единиц, но и для целых бассейнов или природно-климатических зон.

При создании «классических» ГИС активно пропагандируются современные методы географического мониторинга – аэрокос-

мический, подспутниковый и т.д. Ни в коей мере не отрицая необходимости и желательности проведения специальных дистанционных видов исследований, следует иметь в виду, что общие затраты на создание такого рода ГИС достаточно скромного по размерам региона становятся огромными.

В то же время, в территориальных органах природоохранного мониторинга, учебных заведениях, отраслевых институтах и специализированных краеведческих организациях в течении ряда десятилетий накопился богатый, как правило, фактографический материал по различным аспектам исследований в области экономики, естествознания и медицины региона. В подавляющем большинстве случаев этот материал никак серьезно не обрабатывался и хранится в виде полузабытой «бумажной субстанции». Не исключено, что собранная статистическими методами, эта информация бывает зашумлена и даже тенденциозна, а ее пространственная привязка нередко оказывается весьма размытой. Тем не менее, при разумном подходе к ее обработке и интерпретации, эти данные становятся не только важным, но и определяющим звеном информационной модели территории. Во всяком случае, вывод о необходимости проведения комплекса дорогостоящих дистанционных исследований разумно сделать лишь после обобщения всего комплекса уже имеющейся эколого-экономической информации.

Экологическая экспертная (информационная) система оценки качества окружающей среды крупного региона (в т.ч. и бассейна

крупной реки) предназначена для изучения пространственного распределения величин ее параметров, характеризующих состояние различных абиотических и биотических составляющих и степени воздействия на них хозяйственной деятельности человека (антропогенной нагрузки). Такая экологическая экспертная система позволяет:

картографировать величины параметров, характеризующих состояние среды исследуемой территории, и исследовать их изменение во времени;

выделять зоны наиболее и наименее благоприятные по различным показателям качества среды;

оценивать соотношение величин участков с различной степенью проявления того или иного параметра (в % от общей площади территории);

для конкретной точки пространства получать значения по всем характеризующим ее параметрам качества среды;

получать комплексную оценку состояния окружающей среды исследуемой территории по совокупности всех (или определенной части) показателей.

ЭИС призваны обеспечивать решение множества задач (порой, взаимосвязанных между собой). Поскольку состояние окружающей природной среды и отдельных экосистем постоянно меняется в пространстве и времени, то одной из основных задач ЭИС является хранение собранной информации и ее обобщение. Необходимо отметить, что имеют место разнообразные типы данных (количественные, качественные, описательные тексты, списки и пр.). Оперативный выбор требуемой информации, форма ее визуализации, обмен информацией (импорт и экспорт данных) с другими информационными системами – основные функции ЭИС.

Основной задачей оценки *качества окружающей среды*¹ является ее определение в диапазоне существующих в настоящее время шкал с различным числом градаций (от «плохо-хорошо» до нескольких субъективно устанавливаемых «условных» уровней), а также расчет целого спектра индексов (количество которых прямо пропорционально чис-

лу ученых и исследователей), характеризующих состояние экосистем. В решении этой задачи ЭИС могут служить инструментом для проверки адекватности существующих и построения новых шкал, индексов и интегрированных показателей, учитывая огромный опыт и интуицию специалистов. Комплексная оценка экологической обстановки на местном, региональном и федеральном уровнях и эффективный выбор сценариев устойчивого развития системы «Природа – Человек» без применения ЭИС в настоящее время просто невыполнимо.

Разработанная в ИЭВБ РАН [3-5] экспертная экологическая информационная система (ЭИС – REGION) отвечает всем этим требованиям и предназначена для сбора, хранения данных, их анализа и визуализации результатов обработки. ЭИС представляет собой комплекс объединенных в единое целое программ, позволяющих осуществлять в процессе интерактивной работы с пользователем выбор любых, имеющихся в информационном обеспечении системы, объектов информации (пространственных или цифровых) и выполнение над ними различного рода операций.

1. Структура экспертной системы REGION

ЭИС REGION и соответствующая ей база пространственно-распределенных эколого-экономических данных региона, основу которой составляет ретроспективная многоплановая статистика (карты распределения параметров), формально может быть отнесена к ГИС «неклассического типа». Основное ее отличие от типовых баз данных ГИС – это отказ от тщательной детализации чисто географических аспектов территории. Показатель произвольной этиологии (экономический, экологический, климатический и даже чисто географический) «привязывается» к некоторому участку квадратной или прямоугольной формы, имеющему зачастую достаточно большую площадь. Каждый из этих участков приближенно отображается на картосхеме региона, имея в виду точные географические координаты или элементы ландшафта.

Пожертвовав географической эстетичностью, которая по отношению к пространственно размытым данным вряд ли оправдана необходимостью, такая информационная система приобретает не менее привлекательные качества: дешевизна, экономичность в ресурсах, простота в освоении, эксплуатации и интерпретации выходных данных.

ОТБОР И ПОДГОТОВКА ДАННЫХ ДЛЯ ВВОДА В БАЗУ. Показатели, загружаемые в базу, в соответствии со спецификой решаемых задач, могут принадлежать к следующим предметным областям.

1. Физико-географическая характеристика территории: данные о ее географической и геоморфологической принадлежности, типах ландшафта, рельефе, грунтах, почвах, водоемах, гидрогеологических особенностях, климатических факторах, а также об основных тенденциях ландшафтных и климатических изменений.

2. Биоценотическая характеристика территории: биохронологические данные о преобладающих природных экосистемах и популяциях, их видовом составе и разнообразии, численности, биомассе и продуктивности, количественные сведения о круговороте биогенных элементов и о биологической трансформации энергии, соотношении продукции и деструкции на различных трофических уровнях и т.д.

3. Данные гео- и биохимического мониторинга: результаты натурных измерений и расчетные концентрационные поля химических, радиационных, тепловых загрязняющих аномалий, являющихся следствием техногенеза территории, в различных субстратах среды (в атмосфере, почве, снежном покрове, поверхностных и подземных водах, растениях и других живых организмах).

4. Описание промышленного потенциала территориального комплекса и результаты инвентаризации источников газовых выбросов, сточных вод и твердых отходов производства: интенсивность техногенных потоков, химический состав выброса, агрегатные и термодинамические условия эмиссии вещества и энергии в окружающую среду.

5. Данные о продуктивности сельскохо-

зяйственных культур и распределении по территории численности скота и искусственно поддерживаемых популяций животных; сведения об источниках и условиях загрязнения окружающей среды удобрениями, пестицидами и другими продуктами функционирования агропромышленного комплекса.

6. Медико-биологические и санитарно-гигиенические наблюдения о профессиональных источниках временной нетрудоспособности и заболеваемости населения.

Для организации базы данных на основе имеющегося картографического материала, учитывая неоднородность и особенности отображения распределения характеристик на картах, все карты были приведены к единому образцу. Для чего исследуемая территория на каждой из карт была разбита на квадраты километровой сеткой. Так, вся территория Волжского бассейна была разделена на 210 квадратов, каждый площадью около 6,5 тыс. км² (примерно, 80x80 км). При необходимости, ЭИС позволяет легко из имеющихся данных сформировать файлы, несущие информацию по всем параметрам среды в пределах одного квадрата территории (см. далее). База данных всегда может быть дополнена новыми характеристиками и сведениями о новых пространственных объектах, она не является замкнутой и всегда открыта для пользователя.

Детальный перечень базового множества показателей (для Волжского бассейна – 287 параметров) с указанием возможных источников их получения приведен в методическом руководстве [3].

СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ БАЗАМИ ДАННЫХ (СУБД). СУБД различаются по типам поддерживаемых в них моделей данных, среди которых выделяются иерархические, сетевые и реляционные модели и соответствующие им программные средства СУБД. Последние из них – реляционные (как самые продвинутые) СУБД – нашли особо широкое применение при разработке программного обеспечения ГИС (и, соответственно, ЭИС).

СУБД реляционного типа включают в себя структурированные данные в виде таблиц, отношения (relation) между таблицами,

средства создания запросов на изменение (удаление, обновление, добавление), объединение (комбинирование данных из двух и более таблиц), выборку данных по заданным условиям, поддержание целостности системы.

Содержательная база данных ЭИС REGION была первоначально создана в оболочке СУБД dBase III Plus, а часть программного обеспечения обработки данных написана и отлажена в системе Clipper на языке, близком к языку dBase III Plus. Аналогичный подход использован сотрудниками лаборатории моделирования и диагностики геосистем НИИ Географии при Санкт-Петербургском госуниверситете при создании ЭИС оценки качества и состояния водной среды восточной части Финского залива [6] и исследователями Институт вычислительного моделирования СО РАН при создании ЭИС оценки и прогнозирования состояния гидроэкологической системы на примере водосборного бассейна реки Кача (Красноярский край) [7].

В общую базу данных ЭИС включены также параметры, содержащие информацию о комплексных (сводных) показателях (например, комплексная сельскохозяйственная или промышленная нагрузки и пр.). Эти параметры образуют базу «метаданных», полученных в результате обработки первичной информации по методике построения сводных показателей (с учетом «весов» их важности). В настоящее время в среде MS Access разрабатывается вторая версия ЭИС REGION, сохраняя информационную совместимость и преемственность основных концепций первой версии. СУБД MS Access использует язык структурированных запросов SQL (Structured Query Language; навязывается американцами как единый стандарт в работе с реляционными базами данных и внедряется практически во все пакеты) для управления реляционными базами данных и объектно-ориентированную среду программирования на VBA (Visual Basic for Applications).

АЛГОРИТМЫ ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ. Этот блок ЭИС частично реализует экологическую базу знаний, что позволяет дать неформальное описание основных

алгоритмов обработки информации в базе пространственно-распределенных данных. При общей ориентации на текущую версию программного обеспечения, это описание содержит также краткий анализ работоспособности каждого алгоритма и замечания по основным направлениям дальнейшего их совершенствования.

АЛГОРИТМ НОРМИРОВАНИЕ предполагает выбор шкалы баллов и пересчет натуральных значений каждого показателя в целочисленные значения (баллы от 0 до 9). Эта процедура дает возможность визуализировать и вывести на экран дисплея схему распределения показателя по территории в виде цветной видеодиаграммы, получить оцифрованную карту или сконструировать обобщенный показатель.

АЛГОРИТМ КОМПЛЕКС обеспечивает получение по желанию исследователя любого множества различных комплексных показателей из произвольного набора уже имеющихся в базе данных показателей. В состав порождающего подмножества могут входить как исходные, так и ранее синтезированные обобщенные показатели. При этом использование громоздкого формального математического аппарата для автоматического выбора функций, связывающих получаемый обобщенный показатель с векторами порождающего подмножества, как показала практика, в условиях «размытых» целей не дает ощутимых преимуществ по сравнению с методом экспертных оценок.

АЛГОРИТМ РЕГРЕССИЯ реализует один из многих возможных математических методов установления причинно-следственных отношений между совокупностью варьируемых переменных, определяющих факторы воздействия на исследуемый объект, и откликом - параметром состояния объекта. Алгоритм осуществляет оценку параметров уравнения множественной линейной регрессии методом наименьших квадратов с исключением несущественно влияющих факторов по методу И.Я. Лиепы [8]. Возможно использование нелинейной регрессии, построенной методом включения. Еще один метод прогнозирования, значительно меньше связанный с

субъективностью исследователя, основан на построении самоорганизующихся моделей по методике А.Г. Ивахненко [9] – он также позволяет оценить и описать нелинейный характер зависимости. Здесь же используется и оригинальный алгоритм «модельного штурма» [10].

АЛГОРИТМЫ КЛАСТЕРНОГО И ФАКТОРНОГО АНАЛИЗОВ реализуют стандартные процедуры этих методов по «собираемому» из базы данных массиву информации.

2. Некоторые результаты использования ЭИС для различных сценариев воздействия на эколого-экономические системы Волжского бассейна

Территория Волжского бассейна [11-13] – это 1360 тыс. км² (62,2% европейской части России или почти 13% территории всей Европы); она включает 40 административных единиц (областей и автономий; две из них – в Казахстане, остальные – в России; в ЭИС REGION включены 24 административные единицы России, которые дают представление о более чем 90% всей территории Волжского бассейна). В своем движении от истоков к устью крупнейшая река Европы пересекает лесную (до г. Нижний Новгород и Казань), лесостепную (г. Самара и Саратов), степную (до г. Волгограда) и полупустынную зоны. Промышленность и сельское хозяйство в Волжском бассейне дают почти третью часть всей продукции России и, соответственно, пропорционально этому велика антропогенная нагрузка на регион. Все это делает регион Волжского бассейна одним из наиболее напряженных по экологической обстановке.

Используя информацию ЭИС REGION-VOLGABAS, в качестве примера работоспособности ЭИС были проанализированы различные зависимости показателя биологического разнообразия, оцененного индексом Шеннона, с природными параметрами и антропогенными факторами. Была проведена полная статистическая обработка пространственно распределенной (по 210 квадратам, на которые разбит Волжский бассейн) инфор-

мации, построены уравнения линейной и нелинейной регрессии, методом главных компонент определены факторные нагрузки. На рисунке 1 показано распределение некоторых параметров по территории Волжского бассейна (аналогичные схемы для Самарской области на основе ЭИС REGION-SAMARA см. в [14]).

Анализ влияний позволяет сделать вывод о «важности» воздействующих на биоразнообразие факторов (см. таблицу; здесь 1 – наиболее «важный» фактор). Во всех случаях самыми существенными оказались показатели температурного режима территории; «среднее влияние» на биоразнообразие всех объектов оказывает лесистость, плотность населения и вносимые на сельскохозяйственные поля удобрения. Остальные параметры играют незначительную, но специфическую роль.

Линейные регрессионные уравнения для млекопитающих, пресмыкающихся и земноводных Волжского бассейна имеют следующий вид:

$$Y_1 = -3.56 + 0.24 * X_1 + 0.82 * X_2 + 0.37 * X_3 - 0.27 * X_5 + 0.21 * X_6 + 0.27 * X_7 + 0.42 * X_8 ;$$

$$Y_2 = 1.63 + 0.29 * X_1 + 0.29 * X_2 + 0.20 * X_3 - 0.14 * X_4 - 0.19 * X_5 - 0.07 * X_7 ;$$

$$Y_3 = -0.80 + 0.43 * X_1 - 0.25 * X_5 + 0.14 * X_7 + 0.33 * X_8 + 0.32 * X_9 + 0.41 * X_{10} ,$$

где Y_1 , Y_2 и Y_3 – индексы Шеннона (биоразнообразие) для, соответственно, млекопитающих, пресмыкающихся и земноводных Волжского бассейна; параметры X_i – см. в таблице.

Характер распределения видового разнообразия каждой из административных единиц в Волжском бассейне положительно коррелирует с их ландшафтным разнообразием, зависящим от площади и географического расположения области. Последнее наиболее выражено в Среднем Поволжье и Приуралье (Мордовия, Татарстан, Башкортостан, Ульяновская, Самарская области), на стыке лесных (смешанные и лиственные леса) и без-



Рис. 1. Видеограммы распределения некоторых параметров по территории Волжского бассейна
Условные обозначения: градации сверху вниз по возрастанию

лесных (степи и полупустыни) ландшафтов. Распределение пресмыкающихся отклоняется от вышеописанного – их разнообразие увеличивается с севера на юг, достигая максимума в Астраханской области.

Уравнения регрессии позволяют «разыгрывать» разные сценарии воздействия на биоразнообразие. Например, увеличения лесистости для Самарской области (X_1) на 10% при

средних остальных показателях ведет к увеличению индекса Шеннона для млекопитающих (Y_1) на 3-4%; для Башкирии уменьшение на 20% обобщенного влияния удобрений (X_3) увеличит этот индекс Шеннона (Y_1) на 4-5%. Хорошо это или плохо и «стоит ли овчинка выделки» – это уже другая задача рационального природопользования, которая также может быть решена с использованием ЭИС.

Таблица 1. Балльная оценка важности факторов воздействия на биологическое разнообразие (по методу [8])

| Параметры | Млекопитающие | Пресмыкающиеся | Земноводные |
|--|---------------|----------------|-------------|
| Средняя годовая температура воздуха – X_1 | 6 | 1 | 1 |
| Абсолютный max температуры воздуха – X_2 | 1 | 2 | |
| Абсолютный min температуры воздуха – X_3 | 2 | 4 | |
| Среднее количество осадков за год, мм – X_4 | | 6 | |
| Обобщенный показатель влияния удобрений, баллы – X_5 | 4 | 3 | 6 |
| Обобщенный показатель транспортной нагрузки, баллы – X_6 | 7 | | |
| Лесистость, проценты – X_7 | 3 | 5 | 5 |
| Плотность населения, чел/км ² – X_8 | 5 | | 3 |
| Сброс загрязненных вод/площадь, тыс. м ³ /км ² – X_9 | | | 4 |
| Обобщенная пестицидная нагрузка, баллы – X_{10} | | | 2 |

Заключение

Выше изложенное позволяет считать, что разработанная в ИЭВБ РАН экологическая информационная система для анализа пространственно-распределенных эколого-экономических данных REGION способна на новом уровне решать задачи комплексного анализа состояния экосистем региона (страна, бассейн крупной реки, административно-территориальная единица), оценивать характер антропогенной нагрузки, с помощью модельных «сценариев» осуществлять прогноз развития экологической обстановки в регионе и на этой основе давать рекомендации по достижению экологической безопасности, устойчивого эколого-экономического развития и направлений социально-экологической реабилитации территорий.

Работа выполнена при поддержке гранта 10002-251/ОБН-2/151-189/220503-184 Отделения биологических наук РАН по Программе «Фундаментальные основы управления биологическими ресурсами».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Розенберг Г.С., Дунин Д.П. Базы экологических знаний: технология создания и предварительные результаты // Изв. СамНЦ РАН. 1999. Т. 1. № 2.
2. Нейлор К. Как построить свою экспертную систему. М.: Энергоатомиздат, 1991.
3. Розенберг Г.С., Беспалый В.Г., Гайворон Т.Д. и др. База эколого-экономических данных крупного региона (методическое пособие). – Тольятти: ИЭВБ АН СССР, 1991.
4. Розенберг Г.С., Краснощеков Г.П., Шитиков В.К. К созданию пространственно-распределенной базы эколого-экономических данных бассейна крупной реки (на примере Волжского бассейна) // Вопросы экологии и охраны природы в лесостепной и степной зонах: Межвед. сб. науч. тр. Самара: Изд-во Самарский университет, 1995.
5. Rozenberg G.S., Shitikov V.K., Morozov V.G. Expert systems «RE-SERVOIR»: methodology, methods and results // Programme and Abstracts. 3rd International Conference on Reservoir Limnology and Water Quality. Ceske Budejovice (Czech Republic), 1997.
6. Экологическая система оценки качества и состояния водной среды восточной части Финского залива // www.spbu.ru/science/Nii/geography.
7. Белолитецкий В.М., Знаменский В.А., Ноженкова Л.Ф. и др. Разработка информационно-экспертной системы по оценке и прогнозированию состояния гидрозосистемы на примере водосборного бассейна реки Кача // Проблемы информатизации региона. ПИР-98. Труды Всероссий-

- ской конференции. Красноярск, 1998.
8. *Лиена И.Я.* Показатель удельного веса влияния факторов воздействия // Уч. зап. Латв. ун-та. Рига: Изд-во ЛатвГУ, 1971.
 9. *Ивахненко А.Г.* Долгосрочное прогнозирование и управление сложными системами. Киев: Техника, 1975.
 10. *Брусиловский П.М., Розенберг Г.С.* Модельный шторм при исследовании экологических систем // Журн. общ. биол. 1983. Т. 44. № 2.
 11. *Розенберг Г.С., Краснощеков Г.П.* Волжский бассейн: экологическая ситуация и пути рационального природопользования. Тольятти: ИЭВБ РАН, 1996.
 12. *Краснощеков Г.П., Розенберг Г.С.* Естественно-исторические аспекты формирования территории Волжского бассейна // Изв. СамНЦ РАН. 1999. Т. 1. № 1.
 13. *Найденко В.В.* Великая Волга на рубеже тысячелетий. От экологического кризиса к устойчивому развитию. В 2-х т. Н.Новгород: Промгафика, 2003.
 14. *Костина Н.В.* Эколого-информационная система большого региона как основа экологического мониторинга // Региональный экологический мониторинг в целях управления биологическими ресурсами. Тольятти: ИЭВБ РАН, 2003.
 15. *Элер Ч.Н.* Системы управления качеством окружающей среды в региональном масштабе // Труды II Советско-Американского симпозиума «Всесторонний анализ окружающей природной среды». Л.: Гидрометеоиздат, 1976.
-
- ¹ “Хотелось бы определить, что понимается под термином «качество окружающей среды», поскольку на практике он имеет столько значений, сколько людей пытаются его определить. Для санитарного работника качество окружающей среды включает контроль за переносчиками заболеваний, гигиену питания и т.д. Для архитектора или специалиста по планировке городов качество окружающей среды означает внешний вид или эстетику зданий и их расположение в пространстве. Для эколога качество окружающей среды может означать сохранение целостности природной экосистемы и так далее. Этот известный термин имеет то универсальное свойство, что трудно заставить политиков, чиновников, ученых или простых людей прийти к единому мнению о том, что он означает и как его измерить” [15, с. 277].

EXPERT SYSTEM OF ECOLOGICAL STATUS OF BASIN OF LARGER RIVER

© 2003 N.V. Kostina, G.S. Rozenberg, V.K. Shitikov

Institute of Ecology of the Volga River Basin of Russian Academy of Sciences, Togliatti

The conception of originating of ecological expert system is discussed. The structure of the expert system “REGION” and using this system for study ecosystems of the Volga river basin are considered.