



ПРОБЛЕМИ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ І УПРАВЛІННЯ В ЕКОНОМІЧНИХ, ТЕХНІЧНИХ, ЕКОЛОГІЧНИХ І СОЦІАЛЬНИХ СИСТЕМАХ

УДК 519.711

СИСТЕМНАЯ КОНЦЕПЦИЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ КОСМИЧЕСКОГО ГЕОМОНИТОРИНГА ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ПРИРОДОПОЛЬЗОВАНИЯ

А.Д. ФЕДОРОВСКИЙ, Е.Н. БОДНАР

Обосновывается системная концепция повышения эффективности космического геомониторинга на основе комплексного рассмотрения проблем природопользования с развитием космических систем дистанционного зондирования Земли.

ВВЕДЕНИЕ

Современная концепция повышения эффективности космического геомониторинга (КГМ) для решения задач природопользования предполагает не только получение информации об объекте исследований, но и проведение самих исследований, направленных на получение исчерпывающего описания объекта и сопутствующих процессов на основе множества регистрируемых и вычисляемых характеристик. Этим обусловлена необходимость создания качественно новых системных методов использования космической информации (КИ) дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ), повышающих эффективность решения задач природопользования на основе КИ КГМ.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Цель исследований — повышение эффективности и расширение функциональных возможностей КГМ путем создания на основе системной методологии новых методик использования КИ ДЗЗ в задачах природопользования. Это позволит учитывать спрос на КИ КГМ, оценивать геоэкологическое состояние природной среды и риск возникновения чрезвычайных ситуаций, прогнозировать залежи полезных ископаемых, а также моделировать и предвидеть развитие информационно-технических параметров КГМ ДЗЗ в условиях увеличения номенклатуры и объема выполняемых тематических задач.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

В качестве методической основы исследований используется системный подход, всесторонне учитывающий взаимосвязь процессов в сложной сис-

теме, включая технические, экологические, экономические и социальные аспекты [1–4]. Системная методология КГМ должна последовательно связать этапы управления от исходной концепции развития до конкретного плана действий, объединяя весь комплекс мероприятий с учетом прогноза как информационно-технического развития КГМ ДЗЗ, так и геоэкологического состояния природной среды и природоресурсных задач.

Основные этапы системного подхода: разработка концептуальной модели и формирование схемы причинно-следственных связей между элементами системы; построение системной диаграммы модели, которая представляет концептуальную модель в виде таблицы взаимного влияния уровней; формализация модели, т.е. получение в явном виде математических уравнений; определение коэффициентов влияния и выполнение имитационного моделирования.

Системный подход располагает эффективным математическим аппаратом анализа и формализации. Из математического арсенала системного анализа при оценке и прогнозе развития процессов и систем нами использовались методы анализа иерархий (*analytical hierarchy process* — АНР–метод) [5], генетического алгоритма [6], системной динамики [7] и адаптивного баланса влияний (*Adaptive Balance of Causes* — АВС–метод) [8], а также метод оптимальной интерполяции Колмогорова [9]. Задачи классификации решались на основе теории распознавания образов, многокритериальной оптимизации и аппарата нечетких множеств. При дешифрировании космических изображений ДЗЗ применялся структурометрический анализ.

МОДЕЛЬ КГМ

Концептуальная модель КГМ (рис. 1) — это совокупность целевых установок с основными модулями (подсистемами) системы, функционирование которых обеспечивает получение информации, необходимой для решения тематических задач. На основе концептуальной модели формируются основные причинно-следственные связи между уровнями модели, отражающие характер функционирования КГМ.

Причинно-следственные связи в модели выражаются функциями влияния через соответствующие потоки, которые обеспечивают взаимный учет компонент вектора состояния КГМ (уровней X_i) и динамического равновесия системы. Коэффициент функции влияния α_m уровня X_n на уровень X_m в соответствии с видом их взаимосвязи записывается как $\alpha_m(\Delta X_n)$, где ΔX_n — значение приращения уровня X_n .

Для уровней модели введены следующие потоки и цепи обратных связей: X_1 — эффективность КГМ для решения задач природо- и недропользования; X_2 — спрос на космическую информацию ДЗЗ; X_3 — номенклатура и объем решаемых тематических задач; X_4 — формирование требований к параметрам космических снимков; X_5 — оценка качества, выбор и приобретение космических снимков; X_6 — обработка и дешифрирование космических снимков; X_7 — новые функциональные возможности КГМ ДЗЗ

(системные методы решения задач природо- и недропользования); X_8 — затраты на приобретение, обработку, дешифрирование и внедрение КИ КГМ; X_9 — социальный фактор (обеспечение занятости, повышение профессионального уровня, оплата труда, решение социальных вопросов, в том числе за счет отчислений в бюджет); X_{10} — профессиональный уровень операторов и оплата их труда; X_{11} — технические средства обеспечения КГМ; X_{12} — прогноз развития КГМ; X_{13} — экономический фактор использования КИ КГМ.



Рис. 1. Схема причинно-следственных связей концептуальной модели прогнозной оценки эффективности космического геомониторинга при решении задач природопользования

МОДУЛИ КОНЦЕПТУАЛЬНОЙ МОДЕЛИ КГМ

Следующий этап — разработка и исследование основных модулей модели и системных методов КГМ ДЗЗ.

Спрос на информацию КГМ обусловлен такими понятиями, как практическая необходимость, технологическая возможность, экономическая целесообразность. Для их анализа привлекаются приближенные методы, основанные на лингвистическом подходе и экспертной информации [1]. Одним из таких методов является метод анализа иерархий, который позволяет сформировать необходимую целевую функцию и оценить при помощи экспертов степень влияния на нее каждого показателя исследуемой системы.

Иерархическая структура использования космической информации ДЗЗ состоит из пяти уровней.

Оптимизация направлений использования космической информации ДЗЗ для решения хозяйственных и природоохранных тематических задач — нулевой уровень. Первый уровень — перечень природно-хозяйственных отраслей. Второй — источники космической информации ДЗЗ (различные космические аппараты). Третий — информационно-технические характеристики космических снимков. Четвертый — природно-хозяйственные тематические задачи, решаемые с использованием информации КГМ. В дальнейшем в пределах одной задачи или отрасли все характеристики упорядочиваются по приоритетам. Последний (пятый) уровень — это перечень отраслей природно-хозяйственной деятельности, которые используют информацию КГМ для решения тематических задач в системе ГИС. Относительный спрос на информацию КГМ определяется с помощью обобщенного критерия, численные значения которого вычисляются для каждой отрасли природно-хозяйственной деятельности.

С помощью разработанной в Научном центре аэрокосмических исследований Земли Института геологических наук НАН Украины (ЦАКИЗ ИГН НАНУ) программы был исследован спрос на космическую информацию для решения тематических задач сельского хозяйства, экологии и чрезвычайных ситуаций, природных ресурсов, городского хозяйства, геодезии и картографии. Результат показал, что наибольшим спросом информация КГМ пользуется в сельском хозяйстве, экологии и в чрезвычайных ситуациях [10].

Существуют различные методы формирования требований к параметрам космических снимков ДЗЗ. Наиболее перспективный, на наш взгляд, является метод генетического алгоритма (ГА), основанный на эволюционных эмпирических факторах формирования решения, что для рассматриваемого случая параметрического синтеза сводится к нахождению оптимальных значений параметров космических снимков [11]. При этом значения параметров космических снимков должны быть оптимальными для множества информативных характеристик всех тематических задач, хотя для решения конкретной задачи они могут оказаться не лучшими. Эволюционные факторы, используя соответствующие операторы и механизмы, значительно сокращают количество вычислений за счет отсева неперспективных областей поиска.

Качество космических изображений земной поверхности связано, с одной стороны, с чисто объективными техническими характеристиками космического снимка, а с другой — с психофизиологическими особенностями восприятия изображения, носящими субъективный характер. Поэтому дешифрирование космических снимков представляет собой информационно-логический процесс, содержащий смысловое восприятие, мышление, пространственное представление. Большое значение имеет высокая корреляция между критерием оценки качества изображения и зрительным его восприятием при дешифрировании изображения. Традиционно используемыми критериями являются: разрешающая способность; критерии, сформированные на основе пограничной кривой; передаточные характеристики и информационные емкости.

Многочисленные лабораторные и натурные исследования показали, что критерии, сформированные на основе информационных представлений [12], имеют более высокую корреляцию с качеством изображения и вероятностью дешифрирования исследуемых объектов. Такие исследования были проведены в ЦАКИЗ ИГН НАНУ. Анализ их результатов позволил сделать вывод, что наибольшую корреляцию с вероятностью распознавания ландшафтных структур имеет критерий, являющийся по своей физической сути логарифмической формой отношения сигнала к шуму в пространственно-частотной области спектра [13]. Поэтому для оценки информативности космических снимков, предназначенных для решения задач природопользования, может быть рекомендован данный критерий как имеющий наибольшую корреляцию с вероятностью распознавания изображений ДЗЗ.

Среди методов дешифрирования космических снимков ДЗЗ для решения задач КГМ представляет интерес группа геоморфологических методов (ландшафтных, морфографических, морфометрических), где используются разные косвенные признаки (цвет, яркость, структура и текстура), которые воспроизводятся на изображениях земной поверхности. Дешифрирование космических снимков ДЗЗ на базе геоморфографических методов, способствующих исследованию и решению различных задач природопользования, основано на качественном анализе расчлененности рельефа, рисунка гидро-сети, кольцевых структур, линеаментов и других признаков тектонических структур. Геоморфометрические методы позволяют представить качественные морфографические показатели в количественной форме (в виде цифровой информации, карт изолиний и т.д.). Тектурные признаки, благодаря простоте и компактности описаний, значительно расширяют возможности морфологических методов. Их можно сравнить с инвариантами моментов или стохастическими инвариантами.

Для выявления пространственных информативных признаков разных фрагментов используется пространственно-частотный анализ изображений, позволяющий в сжатой форме описать структурные характеристики того или иного фрагмента. Под пространственно-частотным анализом подразумевается представление двумерного распределения плотности фототона исследуемого фрагмента снимка в виде набора соответствующих пространственных гармоник, называемого пространственным спектром [14]. Для вычисления пространственных спектров в ЦАКИЗ ИГН НАНУ разработана программа (DPF) для ЭВМ, которая позволяет выделить на снимке, выведенном на дисплей, фрагмент размером $M_x \times M_y$ пикселей. Эта программа вычисляет для выделенного фрагмента двумерный пространственный Фурье-спектр как для отдельных спектральных каналов, так и для синтезированного из нескольких спектральных слоев снимка.

Известные методы марковских моделей и фрактальной геометрии с их приложениями к описанию форм различных объектов дают возможность построить модели широкого класса пространственно-неоднородных структур [15, 16]. Применение таких моделей является новым подходом к описанию пространственно-неоднородных хаотических структур. Математическую основу этих методов составляет модель поверхностного фрактала, программная реализация которого может использоваться для дешифрирования космических изображений различных ландшафтов.

Оценка геоэкологического состояния природной среды выполняется на основе различных подходов и принципов: ландшафтно-системном, морфолого-генетическом, по степени техногенной нагрузки и др. Суть ландшафтно-системного подхода заключается в анализе природно-техногенной среды как сложной системы с учетом иерархии подсистем (ландшафтных структур), их приоритетов в природной системе и формировании обобщенного критерия классификации [17]. Так, например, оценка качества воды и экологическое состояние водоемов (аквально-ландшафтных комплексов (АЛК)) определяется по гидрологическому режиму водоема (водообмену, скорости течений, солёности, количеству и составу водной растительности). Определив тип АЛК, можно судить о степени техногенного загрязнения водного объекта в целом или его отдельного участка. С этой целью по космическим снимкам и наземным наблюдениям определяются гидрологические параметры водоема и видовой состав растительных ассоциаций с определением их вида и вычислением занятых ими площадей. Поскольку классификация АЛК по типам представляет собой иерархический многоуровневый процесс, для оценки геоэкологического состояния водоемов был применен метод многокритериальной оптимизации [18]. Ниже приводится фрагмент этой методики в части оценки экологического состояния АЛК.

Задача состоит в отнесении исследуемого АЛК к конкретному классу из множества эталонных АЛК^{*}_{*j*}, параметры которых находятся в базе данных. Количество эталонных классов $j=1,2,\dots,k$. Обозначим исследуемый участок водного объекта (АЛК) с растительными ассоциациями

$$A = [a_1(s_1), a_2(s_2), \dots, a_i(s_i), \dots, a_n(s_n)],$$

где a_i — вид ассоциаций; s_i — площадь, занимаемая ассоциацией; $i=1,\dots,n-1$, n — количество ассоциаций.

Точное совпадение площадей, занятых в АЛК тем или иным видом растительности, включенных в базу эталонных данных, маловероятно. Поэтому в базе данных указаны не точные значения площадей, а их диапазоны, заданные нижней $\underline{x}(a_{ij})$ и верхней $\bar{x}(a_{ij})$ границами. В естественных условиях видовой состав растительности и структура ассоциаций непрерывно изменяются под воздействием внешних факторов, и происходит плавный переход одного типа в другой. Для учета этого обстоятельства при классификации АЛК используется теория нечетких множеств [19], позволяющая заменить точную принадлежность водного участка с растительностью к любому АЛК на непрерывную функцию принадлежности. Последняя определяет меру принадлежности исследуемого участка ко всем возможным АЛК^{*}. Классификация и отнесение водного участка к конкретному типу АЛК^{*} производится по максимальному значению обобщенного критерия — функции принадлежности.

На основе изложенного выше в ЦАКИЗ ИГН НАНУ разработана компьютерная программа, позволяющая на основе космической информации и наземных наблюдений классифицировать водные объекты по степени техногенного загрязнения [20].

Прогнозная оценка залежей полезных ископаемых для последующей геофизической разведки выполняется на основе анализа космических изображений исследуемой территории по множеству информативных признаков. Известно, что по совокупности признаков, которые уверенно дешифрируются на космических снимках и дополняются материалами наземных и подспутниковых измерений (геологических, геофизических и географических), возможно прогнозировать с определенной степенью достоверности наличие залежей полезных ископаемых, не поддающихся прямому обнаружению [21]. На основе накопленного опыта дистанционных и наземных наблюдений известных месторождений в конкретном регионе создается «портрет» — эталон участка территории в виде набора информативных признаков, косвенно подтверждающих наличие залежей полезных ископаемых. Прогноз наличия залежей на всей исследуемой территории выполняется путем сравнения информативных признаков исследуемого участка с соответствующими признаками эталона. По уровню совпадения последних определяется степень перспективности исследуемого участка. Для формализации процесса автоматического сравнения участков с принятым эталоном применяются методологию классификации дискретных объектов с использованием соответствующих алгоритмов и программ.

Предложенный способ был использован в ЦАКИЗ ИГН НАНУ для разработки метода поиска нефтегазоносных участков и успешно применен при исследовании территории Днепровско-Донецкой впадины и шельфа Каспийского моря [22].

Прогноз развития КГМ ДЗЗ выполняется с использованием метода научно-технологического предвидения — качественного и количественного предвидения динамики развития различных процессов, технологий и систем. В НУК «ИПСА» разрабатываются методологические принципы реализации стратегии технологического предвидения, что позволяет формировать альтернативные сценарии развития сложных систем [23].

В рассматриваемом случае задача заключается в выборе наиболее перспективного сценария развития КГМ ДЗЗ на основе прогнозных оценок расширения номенклатуры тематических задач ДЗЗ и тенденций развития КС ДЗЗ. Особенность данного исследования состоит в том, что варианты сценариев развития формируются на описательном уровне, характеризуются информационной неопределенностью, а при выборе наиболее перспективного варианта учитывается множество показателей эффективности. Из этого следует, что для решения задачи выбора перспективного направления развития КГМ ДЗЗ необходимо использовать экспертные процедуры оценивания, а также аппарат нечетких переменных и теорию принятия решений [24].

МОДЕЛИРОВАНИЕ КГМ

На заключительном этапе исследований выполнено моделирование КГМ и прогнозная оценка развития эффективности КГМ ДЗЗ.

С этой целью для формализации модели КГМ использовался АВС-метод, который позволяет создавать математические модели динамических процессов с помощью уравнений стандартного типа и моделировать процес-

сы, происходящие в сложных системах. В результате формализации динамической модели КГМ получим систему уравнений, например,

$$X_{8k} = X_{8j} + \tau X_{8j} [\alpha_{83}(\Delta X_3) + \alpha_{84}(\Delta X_4) + \alpha_{85}(\Delta X_5) + \alpha_{86}(\Delta X_6) + \alpha_{810}(\Delta X_{10}) + \alpha_{811}(\Delta X_{11})],$$

где τ — интервал времени, на протяжении которого значения функций влияния можно считать приблизительно постоянными; α — коэффициенты влияния модели.

Адекватность подобных моделей для реальных процессов во многом зависит от правильного выбора коэффициентов влияния модели, для определения которых используется один из двух возможных способов: метод оптимальной интерполяции Колмогорова или метод экспертной идентификации коэффициентов с помощью анализа иерархий. Основная идея последнего — определение коэффициентов, соответствующих степени влияния конкретного фактора на вышестоящий в иерархии фактор, путем их парного сравнения.

После идентификации коэффициентов динамическая модель становится инструментом имитационного моделирования, что дает возможность прогнозировать развитие КГМ ДЗЗ для решения задач природопользования.

На основе сформированных уравнений и вычисленных коэффициентов влияния в ЦАКИЗ ИГН НАНУ разработана компьютерная программа и выполнено соответствующее моделирование. Для получения достоверных прогнозных сценариев, отражающих реальные взаимодействия между уровнями системы, коэффициенты влияния уточнялись в процессе модельного эксперимента.

Результат моделирования развития эффективности КГМ показал, что на первом этапе внедрения КИ КГМ при непрерывном росте затрат (X_8) и объеме решаемых тематических задач ДЗЗ (X_3) не наблюдается увеличения эффективности КГМ. Это можно объяснить значительными первоначальными затратами при внедрении КИ КГМ (приобретение технических средств, методик и программ для дешифрирования, подготовка операторов и оборудование рабочих мест). Значение эффективности в этом временном интервале находится на постоянном уровне, после которого начинается постоянный рост эффективности пропорционально росту номенклатуры решаемых тематических задач ДЗЗ (X_3). С этого же момента наблюдается снижение затрат (X_5), так как основная материальная и профессиональная кадровая база для внедрения КИ КГМ уже создана. Имитационные эксперименты с моделью показали, что она адекватно реагирует на изменения входящих в нее уровней, позволяет наблюдать динамику вектора состояния системы и находить сценарии функционирования, при которых динамика изменения эффективности КГМ согласуется с рациональным использованием затрат и объемом решаемых тематических задач (номенклатуры).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотренные методы системного подхода к решению задач природопользования на основе космической информации дистанционного зондирования

Земли позволяют расширить функциональные возможности космического геомониторинга и тем самым повысить его эффективность

ЛИТЕРАТУРА

1. Згуровский М.З., Панкратова Н.Д. Системный анализ: проблемы, методология, приложения. — Киев: Наук. думка, 2005. — 743 с.
2. Моисеев Н.Н. Математические задачи системного анализа. — М.: Наука, 1981. — 487 с.
3. Тимченко И.И., Игумнова Е.М., Тимченко И.Е. Образование и устойчивое развитие. Системная методология. — Севастополь: Экокси-гидрофизика, 2004. — 527 с.
4. Forrester J.W. Principles of Systems. — Cambridge MA: Productivity Press, 1968. — 320 p.
5. Саати Т. Принятие решений. Метод анализа иерархий. — М.: Радио и связь, 1993. — 186 с.
6. Федоровский А.Д., Артюшенко М.В., Козлов З.В. Параметрический синтез космических систем зондирования Земли на основе генетического метода // Космічна наука і технологія. — 2004. — **10**, № 1. — С. 54–60.
7. Forrester J.W. Industrial Dynamics. — Cambridge MA: Productivity Press, 1961. — 391 p.
8. Тимченко И.Е., Игумнова Е.М., Тимченко И.И. Системный менеджмент и АВС-технологии устойчивого развития. — Севастополь: Экокси-гидрофизика, 2000. — 224 с.
9. Колмогоров А.Н. Интерполирование и экстраполирование стационарных случайных последовательностей // Изв. АН СССР. Серия матем. — 1941. — № 5. — С. 3–11.
10. Лищенко Л.П., Федоровський О.Д., Якимчук В.Г. Оптимізація напрямків використання космічної інформації ДЗЗ // Геоінформатика. — 2006. — № 1. — С. 65–69.
11. Федоровский А.Д., Артюшенко М.В., Козлов З.В. Параметрический синтез космических систем зондирования Земли на основе генетического метода // Космічна наука і технологія. — 2004. — **10**, № 1. — С. 54–60.
12. Шеннон К. Работы по теории информации и кибернетики. — М.: ИЛ, 1963. — 829 с.
13. Федоровский А.Д., Суханов К. Ю., Якимчук В.Г. К вопросу оценки космических снимков для дешифрирования природных ландшафтов // Космічна наука і техніка. — 1999. — **5**, № 1. — С. 24–31.
14. Дубинский Г.П., Кононов В.И., Федоровский А.Д. Методы оценки качества оптических систем. — М.: Машиностроение, 1978. — 231 с.
15. Якимчук В.Г. Об использовании марковской модели изображений для дешифрирования космических снимков ландшафтов // Доп. НАНУ. — 2002. — № 8. — С. 110–114.
16. Метод фрактальной геометрии при дешифрировании космических снимков ландшафтных комплексов / А.Д. Федоровский, В.Г. Якимчук, О.В. Никитенко и др. // Доп. НАНУ. — 2002. — № 9. — С. 119–124.
17. Лищенко Л.П., Рябоконеко С.А., Федоровський А.Д. Оценка геоэкологического состояния горнопромышленных территорий на основе ландшафтно-системного подхода и аэрокосмической информации // Екологія довкілля та безпека життєдіяльності. — 2004. — № 2. — С. 5–11.

18. *Fedorovsky A.D., Suhanov K.Yu., Yakimchuk V.G.* The estimation of ecological condition of natural water systems with use of system approach // *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*. — Vol. XXXII. — Part 7 (Budapest, 1998). — P. 706–707.
19. *Кофман А.* Введение в теорию нечетких множеств. — М.: Радио и связь, 1982. — 432 с.
20. *Федоровский А.Д., Сиренко Л.А., Якимчук В.Г.* Оценка экологического состояния водоемов с использованием космической информации // *Космічна наука і техніка*. — 1996. — 2, № 5–6. — С. 103–106.
21. *Лялько В.І., Маринич О.М., Федоровський О.Д.* Аерокосмічні дослідження ландшафтних комплексів України // *Укр. геогр. журн.* — 1994. — № 4. — С. 3–8.
22. *Оцінка* нафтогазоперспективності територій з використанням системного підходу та космічної інформації для наступної геофізичної розвідки / Т.О. Архіпова, З.М. Товстюк, З.В. Козлов та ін. // *Геоінформатика*. — 2006. — № 3. — С. 40–45.
23. *Панкратова Н.Д.* Математическое обеспечение задач технологического предвидения применительно к отрасли промышленности // *Системні дослідження та інформаційні технології*. — 2003. — № 1. — С. 26–33.
24. *Системная* стратегия выбора перспективного варианта развития космической системы ДЗЗ / Л.Ф. Даргейко, Е.Н. Боднар, З.В. Козлов, А.Д. Федоровский // *Системні дослідження та інформаційні технології*. — 2006. — № 4. — С. 46–51.

Поступила 13.03.2007