

УДК 528.8.04

А. Д. Федоровский, Е. Н. Боднар, З. В. Козлов

Науковий центр аерокосмічних досліджень Землі Інституту геологічних наук НАН України, Київ.

**Системная методология развития
космического геоэкологического мониторинга**

Надійшла до редакції 12.12.05

Обґрунтовується системна методологія космічного геоекологічного моніторингу земної поверхні на основі комплексного розгляду задач, пов'язаних з розвитком космічних систем дистанційного зондування Землі, і проблем оцінки техногенного впливу на геологічне середовище в результаті господарської діяльності.

Современная концепция космического геоэкологического мониторинга (КГЭМ) земной поверхности состоит не только в обеспечении регулярного наблюдения за развитием экологического состояния природной среды, но и в использовании новых функциональных возможностей. Например, анализа спроса на космическую информацию дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ), оценки информационной эффективности космических систем ДЗЗ, моделирования и прогноза развития геоэкологической обстановки при техногенном воздействии на геологическую среду и др.

Под геологической средой понимается многокомпонентная динамическая природная система, которая сложилась из системы геологических структур, разного вида тектонических нарушений, находящихся под влиянием техногенной нагрузки [3].

На основе созданных за последние годы более совершенных космических систем ДЗЗ с высокими информационно-техническими параметрами появилась возможность получения разноплановых космических снимков с высоким пространственным и спектральным разрешением. Для более эффективного их использования в новых информационных технологиях потребовалось создание специальной методологической базы, аккумулирующей достижения современных науч-

ных исследований на качественно новом уровне.

Так как система КГЭМ обладает всеми признаками сложной системы [8, 18], то в качестве такой программно-целевой методологии может быть выбран системный подход, эффективно использующий знания о природе сложных систем для построения математических моделей, моделирования и создания информационных технологий управления устойчивым развитием сложных систем, обеспечивающих последовательное продвижение к поставленным целям.

Цель работы — обоснование системной методологии космического геоэкологического мониторинга земной поверхности, органически связывающей задачи управления устойчивым информационно-техническим развитием космических систем ДЗЗ и проблему оценки негативного влияния результатов хозяйственной деятельности на окружающую геологическую среду.

В литературе, особенно зарубежной, имеются различные определения и формулировки основ системного подхода [11, 17, 30]. Мы используем из них те, которые, на наш взгляд, в большей степени соответствуют рассматриваемой задаче. Это прежде всего работы И. Е. Тимченко, Е. М. Игумновой и И. И. Тимченко. Так, согласно определению [16] системная методология — это синтез системных принципов анализа проблемы, системного мышления, системного

моделирования и системного управления устойчивым развитием.

Системные принципы являются основой методологии управления устойчивым развитием, сопоставляя необходимое и достижимое, желаемое и возможное, прогнозируемый эффект и затрачиваемые ресурсы. В работе [15] сформулированы следующие шесть системных принципов системной методологии: условности целей, которые в процессе управления развитием неизбежно претерпевают изменения; целостности системы, которая должна быть собрана из отобранных предварительно разложенных составных частей; причинности, управляющим синтезом системы; подчиненности, определяющим место системы в иерархии систем; динамического баланса, представляющим развитие системы как реакцию на изменение внешних и внутрисистемных процессов; информационного единства, связывающим результаты прогностического моделирования и непосредственных наблюдений.

Системное мышление представляет собой ментальную технологию принятия решений, ведущих к поставленным целям, и воплощает на практике системные принципы.

Системное моделирование позволяет обосновать наиболее рациональные методы построения математических моделей сложных систем и моделировать происходящие в них процессы. Под *управлением устойчивым развитием* понимаются последовательные действия, неуклонно приближающие текущее состояние системы к ожидаемому состоянию, стимулируя тем самым дальнейшее управляемое развитие.

Если системная методология — теория, то системный анализ — это практика применения математических методов для достижения цели. Последовательная реализация с помощью системного анализа перечисленных выше четырех компонентов системной методологии позволяет создать информационную технологию управления устойчивым развитием КГЭМ. Последний является неотъемлемой частью любой социально-экономической системы общества, обеспечивая контроль и прогнозирование развития геоэкологической ситуации на локальном, региональном и государственном уровнях.

Проблема информационно-технического развития космических систем ДЗЗ состоит в:

- исследовании информативных признаков экологического состояния геологической среды и разработке методов их дешифрирования;
- развитии нового направления в ДЗЗ — системной оценки информационной эффективности и моделирования космических систем ДЗЗ.

Для проблемы техногенного влияния на геологическую среду актуально решение следующих задач:

- разработка на основе космической информации ДЗЗ методик оценки уровня техногенной нагрузки и связанного с этим риска возникновения кризисных ситуаций;
- разработка новых методов системного моделирования и прогнозирования развития геоэкологических процессов на основе космической информации ДЗЗ.

Системная методология КГЭМ последовательно связывает этапы управления от исходной концепции до конкретного плана действий, объединяя весь комплекс мероприятий для решения проблем как информационно-технического развития космических систем ДЗЗ, так и оценки влияния техногенной нагрузки на геологическую среду.

На рис. 1 представлена структура системной методологии КГЭМ, раскрывающая последовательность действий при формировании информационной технологии управления устойчивым развитием КГЭМ как последовательное продвижение от концепции развития КГЭМ до информационной технологии управления развитием КГЭМ. Ниже раскрывается содержание основных модулей структурной схемы системной методологии КГЭМ.

Концепция развития КГЭМ соединяет целевые установки КГЭМ, связанные с получением космической информации для решения тематических задач ДЗЗ и результаты влияния хозяйственной деятельности на геологическую среду.

Анализ тематических задач ДЗЗ основан на информационных материалах Комитета спутникового наблюдения Земли (СЕОС), членом которого с 1993 г. является Украина, а также возможностей использования данных ДЗЗ при решении тематических задач природопользования и хозяйственной деятельности [28].

Выбор и оценка космических снимков для КГЭМ основаны на анализе как оптических спектральных, так и структурно-текстурных ха-

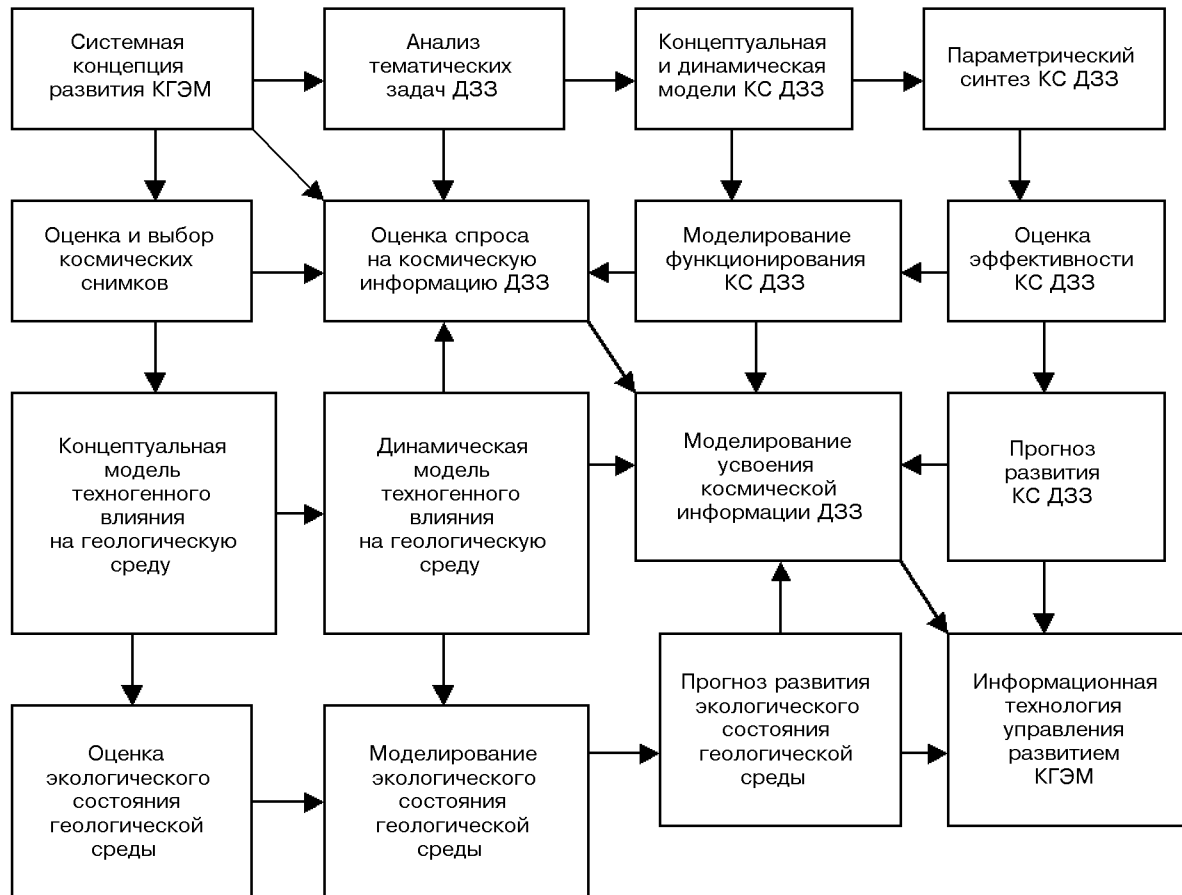


Рис. 1. Структура системной методологии формирования информационной технологии управления устойчивым развитием КГЭМ

рактических изображений. Уже в ранних работах по дешифрированию аэрокосмических изображений природных ландшафтов была показана значимость плановой структуры и текстуры изображений [27], в том числе размеров и формы контуров элементов ландшафта, их ориентации и взаимного расположения в изображении, а также их производных характеристик — пространственных спектров, гистограмм распределения, матриц смежности, параметров Харалика и др.

Для оценки состояния геологической среды используются космические снимки различных спектральных и масштабных диапазонов. При этом на каждом масштабном уровне используются свои физиономические информативные признаки объектов, которые различаются не только

по морфологии, но и по генезису. В этом случае анализ космической информации представляет собой иерархический многоуровневый процесс. Так, например, для выявления зон локализации глубинных и региональных тектонических разломов наиболее информативными оказываются мелкомасштабные космические снимки, когда в результате естественной оптической генерализации роль мелких деталей рельефа и почвенно-растительного покрова как маскирующего фактора снижается настолько, что через косвенные признаки наиболее отчетливо проявляются элементы глубинного строения земной коры. При дешифрировании среднemasштабных космических изображений становится возможным анализ экзогенных форм рельефа, которые связаны с литологическими особенностями горных пород

и их гидрогеологическими условиями. Для решения задач землепользования используются крупномасштабные снимки, анализ которых осуществляется на фитоэкзоморфогенном уровне, когда в качестве информативных признаков выступают не только яркостные признаки оптических спектров, но и структурно-текстурные признаки. При этом существенную роль играет качество космических снимков, которое непосредственно связано с параметрами регистрирующей аппаратуры ДЗЗ, условиями съемки, а также методами обработки космических снимков.

Известны различные критерии, предназначенные для оценки оптических систем по качеству изображений. Одним из традиционных критериев, характеризующих качество изображений, является линейная разрешающая способность на исследуемой земной поверхности, которой соответствует минимальный элемент разрешения изображения, например пиксел цифрового космического снимка. Однако при проведении дешифрирования ландшафтных структур было замечено, что не всегда лучший по разрешению снимок обеспечивал более высокий уровень распознаваемости элементов ландшафтных структур и достоверную их классификацию.

В работе [24] приведены результаты физического и компьютерного исследования, которые показали, что критерий, сформированный как логарифмическое отношение сигнала к шуму в пространственно-частотной области спектра [31], имеет наибольшую корреляцию с вероятностью дешифрирования изображений различных моделей среди традиционных критериев. Результаты физического моделирования были апробированы при оценке космических снимков одного и того же участка Дымерского лесного массива Чернобыльско—Лютежского полигона, которые были получены в одно время года разными сканирующими оптическими системами ДЗЗ спутников: «Природа», «Landsat», «Spot» и IRS. По результатам эксперимента снимки спутников IRS и Spot имеют более высокое значение исследуемого критерия и соответственно более высокую информативность, чем «Природа» и «Landsat», что подтверждается многолетней практикой дешифрирования и анализа космических изображений.

Оценка спроса на космическую информацию КГЭМ или определение потенциальных

потребителей космической информации связана с такими понятиями, как практическая необходимость, технологическая возможность, экономическая целесообразность. Для их анализа привлекаются приближенные методы, основанные на лингвистическом подходе и экспертной информации. Одним из таких методов является метод анализа иерархий [12, 21], который позволяет сформировать необходимую целевую функцию и оценить с помощью экспертов степень влияния на нее каждого показателя исследуемой системы.

Основная проблема использования метода — это последовательная декомпозиция целевой функции на более простые критериальные составляющие — показатели, объединяемые в соответствующие иерархические уровни. После построения иерархической схемы производится экспертное попарное сравнение показателей по иерархическим уровням. На каждом уровне, начиная с первого, последовательно попарно сравнивается влияние показателей исследуемого уровня на показатели предшествующего уровня. При этом эксперты устанавливают для каждой пары показателей определенный балл в шкале относительной значимости по балльной системе от 1 до 9 [13].

В рассматриваемом случае на нулевом уровне рассматривается относительный вклад в систему КГЭМ всей совокупности космической информации, используемой при решении тематических задач. К ним относятся: анализ исследуемого пространства, построение различных карт, численные оценки, поиск объектов и др., которые составляют следующий — первый уровень иерархии. Для решения тематических задач используется информация со многих космических аппаратов, каждый из которых имеет свои значения параметров. Последние составляют второй уровень. Перечень характеристик космической информации ДЗЗ, используемых при решении тематических задач, составляют третий уровень. Построение шкалы попарных балльных оценок завершается определением приоритетов влияния различной космической информации ДЗЗ на решение тематических задач по каждой природоохранной и хозяйственной отрасли нижнего — четвертого уровня.

Для формализации экспертных процедур строится множество матриц парных сравнений

для каждого уровня и соответственно по каждой составляющей уровня. После построения матриц вычисляются частные и глобальные векторы приоритетов K_1^1 , K_m^2 , K_r^3 и K_p^4 соответствующих уровней.

После многоступенчатой обработки экспертных суждений вычисляется обобщенная статистика F по каждой отрасли, что и характеризует относительное использование космической информации ДЗЗ в различных отраслях хозяйственной и природоохранной деятельности

$$F = \sum K_1^1 \sum K_m^2 \sum K_r^3 \sum K_p^4 x_p^s,$$

где верхний индекс критериального приоритета обозначает номер уровня иерархии; l, m, r, p — порядковый номер составляющих вектора; x_p^s — коэффициент предпочтительности варианта p по показателю s .

В результате эксперимента [21] для космического аппарата типа «Січ» наибольшие значения статистики F , а следовательно, и востребованность космической информации, были получены при решении задач сельского хозяйства и чрезвычайных ситуаций.

Модель процесса усвоения космической информации в КГЭМ создается с использованием метода адаптивного баланса влияний — Adaptive Balance of Causes (ABC-метод), который был разработан в работе [15] на основе метода системной динамики Д. Форрестора [29]. ABC-метод позволяет моделировать и прогнозировать развитие сложных систем и выполняет вычислительные функции с учетом взаимодействия всех модулей, каждый из которых находится в состоянии динамического равновесия. Равновесие поддерживается функциями влияния, связывающими данный модуль с другими модулями системы. Режим динамического баланса влияний внутри системы сохраняется под управлением внешнего воздействия на систему.

ABC-метод позволяет моделировать и прогнозировать развитие сложных систем путем следующих операций:

- создания унифицированного модуля из элементов управляемой системы, которые являются параметрами ее вектора состояния,
- определения взаимных влияний модулей для объединения их в структуру модели системы,

- создания на основе причинно-следственных связей концептуальной и численной динамической моделей для моделирования сценариев развития системы.

В соответствии с ABC-методом строится системная диаграмма. В последней для уровней модели введены потоки и цепи обратных связей. Причинно-следственные связи в системной диаграмме, выраженные посредством функций влияния через соответствующие потоки, обеспечивают взаимное влияние составляющих вектора состояния КГЭМ и динамическое равновесие системы. После построения системной диаграммы появляется возможность записать динамические уравнения модели в явном виде. На основе полученной системы динамических уравнений и заданного начального вида функций влияния, выполняются эксперименты по имитации динамики поведения системы при различных воздействиях на ее уровни. Для получения достоверных прогностических сценариев, отражающих реальные взаимодействия между уровнями системы, характер и параметры функций влияния уточняются в процессе модельного эксперимента.

Концептуальная модель внедрения космической информации КГЭМ включает уровни, которые отображают объем информации, получаемой с помощью мониторинга (км^2), объем используемой информации КГЭМ, объем плановых затрат на мониторинг и на внедрение информации КГЭМ, уровни качества мониторинга и потребности в информации мониторинга, себестоимость и цену выполнения 1 км^2 мониторинга, усилия на внедрение информации КГЭМ, производительность труда, прибыль от выполнения мониторинга, оплата труда исполнителям мониторинга, профессиональный уровень операторов КГЭМ и затраты на подготовку операторов КГЭМ.

В работе [23] приведены результаты моделирования КГЭМ, из которых следует, что на первом этапе при непрерывном увеличении затрат, направленных на внедрение космической информации в КГЭМ, вопреки ожидаемому увеличению объемов продукции мониторинга наблюдалась обратная реакция — выпуск продукции уменьшается. После определенного времени использование космической информации в КГЭМ приводит к заметному увеличению производительности труда и соответственно произ-

водства. Плановый объем продукции мониторинга восстанавливается и продолжает увеличиваться вместе с увеличением производительности труда.

Полученный сценарий развития процесса внедрения космической информации в КГЭМ является результатом сложных нелинейных взаимодействий внутри системы. Наблюдаемое в начальный период уменьшение объема продукции мониторинга и прибыли от ее реализации, является результатом сокращения плановых затрат на выполнение мониторинга за счет их частичного отвлеченения на затраты, связанные с внедрением космической информации КГЭМ. После срабатывания усилий, направленных на усвоение информации КГЭМ, за счет последней повышается производительность мониторинга, прекращается падение, а со временем и постепенное увеличение объема производимой продукции мониторинга и прибыли от ее реализации. Это явление получило название «парадокс усовершенствования», на который в рассматриваемом случае влияют: связь использования информации КГЭМ с качеством мониторинга, уровень профессиональной подготовки производственных кадров, давление производственного плана и т. д.

Уточняя функции влияния, можно обосновать такой сценарий функционирования КГЭМ, при котором используемый объем и соответствующие затраты на космическую информацию будут поддерживаться на уровне, удовлетворяющем спрос потребителей информации и ресурсные возможности, предназначенные для выполнения мониторинга.

Концептуальная и динамическая модели космических систем ДЗЗ формируются на основе анализа тематических задач программы ДЗЗ и информационно-технических параметров космических систем ДЗЗ.

Концептуальная модель представляет собой структурный граф, отображающий причинно-следственные связи в системе КГЭМ. Это совокупность целевых установок с основными модулями (подсистемами) системы, функционирование которых обеспечивает получение информации, необходимой для решения тематических задач. В состав модели входят следующих основные модули: планирования и управления зондированием, орбитальных параметров космическо-

го аппарата, аппаратного комплекса КГЭМ, бортовых запоминающих устройств, каналов связи, координат и параметров наземных пунктов приема космической информации, обработки информации ДЗЗ. На основе концептуальной модели формируются основные причинно-следственные связи между уровнями модели, отражающие характер функционирования подсистем космических систем ДЗЗ.

Динамическая модель космических систем ДЗЗ создается на основе причинно-следственных связей концептуальной модели. В работах [25, 26] приведены математическая модель космической системы ДЗЗ, построенная на основе АВС-метода, и результаты моделирования по имитации динамики поведения космических систем ДЗЗ при различных воздействиях на ее уровни.

Построение модели и моделирование техногенного влияния на геологическую среду в эколого-экономической системе выполняется в два этапа: на первом строится концептуальная модель, отражающая причинно-следственные связи в эколого-экономической системе, а на втором производится ее формализация и моделирование.

Концептуальная модель включает уровни, которые отображают объем производства (X_8), объем потребления природных ресурсов (X_9), экологическое состояние геологической среды (X_3), техногенную нагрузку на геологическую среду (X_2), природно-охранные мероприятия (X_5), ограничение потребления природных ресурсов (X_6), рентабельность производства (X_4), экологический штраф (X_1) и ресурсную ренту (X_{11}), себестоимость продукции (X_1) и спрос (X_7) на нее. Основная проблема состоит в поддержании баланса в потреблении природных ресурсов, при нарушении которого включаются механизмы, ограничивающие их потребление. Стимулом увеличения объема производства служит рентабельность производства, которая зависит от спроса на производимую продукцию, себестоимости производства и отчислений на погашение ресурсной ренты и штрафов за нарушение экологии. Последнее является результатом техногенной нагрузки, зависящей от объемов производства.

На рис. 2 показано изменение со временем некоторых вычисленных модельных уровней. Видно, что на первом этапе при беспрерывном

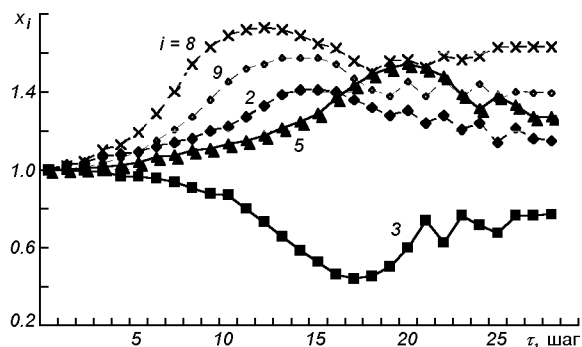


Рис. 2. Результаты моделирования техногенного влияния на геологическую среду в эколого-экономической системе

увеличении объемов производства (X_8) наблюдается увеличение техногенной нагрузки (X_2) и увеличение потребления ресурсов (X_9). При этом в регионе ухудшается экологическая обстановка (X_3) и после 16-го шага, с некоторым отставанием от изменений состояния экологии, активизируются природоохранные мероприятия (X_5). После 20-го отсчета реализация природоохранной программы приводит к заметному улучшению экологии и стабилизации потребления природных ресурсов.

Имитационные эксперименты с моделью показали, что последняя адекватно реагирует на изменения входящих в нее уровней, позволяет наблюдать динамику вектора состояния системы и находить сценарии устойчивого функционирования, при которых задачи производства согласуются с рациональным использованием природных ресурсов. Уточняя функции влияния, можно обосновать такой сценарий функционирования системы, при котором используемый объем природных ресурсов и соответствующие техногенные нагрузки будут поддерживаться на уровне, удовлетворяющем экологическое состояние геологической среды.

Параметрический синтез аппаратного комплекса космических систем ДЗЗ осуществляется на основе анализа информативных признаков процессов и объектов, которые необходимо регистрировать на земной поверхности для решения научно-прикладных тематических задач ДЗЗ. Для решения конкретной тематической задачи идеальными параметрами аппаратного комплекса являются их значения, полностью совпадающие со значениями информа-

тивных признаков, регистрируемых на земной поверхности. Однако в случае выполнения научно-прикладной программы, включающей различные тематические задачи, эти параметры, вероятнее всего, не будут оптимальны для регистрации всего множества информативных признаков. Поэтому задача состоит в определении компромиссного варианта значений параметров, которые позволят обеспечить выполнение всех тематических задач программы ДЗЗ с наибольшей эффективностью. С этой целью составляется морфологический блок вариантов значений параметров, в котором количество строк равно числу различных информативных характеристик тематических задач всей программы, а элементами строк являются их значения, изменяющиеся в каждой строке от минимального до максимального значения. Полученные таким образом значения элементов строк используются в дальнейшем в качестве значений параметров, из которых формируются принципиально возможные варианты состава значений параметров аппаратного комплекса. Общее количество принципиально возможных вариантов состава значений параметров равно

$$N = \prod_{j=1}^m \sum_{r=b_{j \min(j)}}^{b_{j \max(j)}} b_{jr}, \quad (1)$$

где $b_{j \min(j)}$ и $b_{j \max(j)}$ — минимальное и максимальное значения j -го параметра, равные соответствующим минимальному и максимальному значениям j -й информативной характеристике тематических задач; b_{jr} — значение r -го варианта j -го параметра аппаратного комплекса; $r = \min(j), 2, 3, \dots, \max(j)$; $j = 1, 2, \dots, m$; m — количество параметров аппаратного комплекса.

Задача параметрического синтеза сводится к нахождению состава значений параметров, при которых эффективность решения всех тематических задач принимает максимальное значение.

Анализ формулы (2) показывает, что при нахождении искомого варианта состава аппаратного комплекса ДЗЗ путем прямого перебора число возможных вариантов становится чрезвычайно большим, и эта задача становится непосильной. Очевидно, что для проектирования современных аппаратных комплексов ДЗЗ требуется поиск принципиально новых информационных подходов.

Для решения поставленной задачи был избран генетический алгоритм, который относится к классу эвристических методов поиска квазиоптимальных решений, где другие методы оптимизации или непригодны для решения такого класса задач или имеют меньшее быстродействие (метод перебора вариантов, методы случайного поиска). Генетический алгоритм — адаптивный поисковый алгоритм, основанный на эволюционных эмпирических факторах получения решения, что для рассматриваемого случая параметрического синтеза, сводится к нахождению оптимальных значений параметров аппаратного комплекса ДЗЗ для решения всего множества планируемых тематических задач программы ДЗЗ. Эволюционные факторы обеспечивают адаптацию алгоритма к особенностям поискового пространства решений, что значительно сокращает количество вычислений за счет отсева неперспективных областей поиска.

Для сокращения количества просматриваемых вариантов решений задачи генетические алгоритмы используют соответствующие операторы и механизмы: генерации начальной популяции, оценки качества хромосомы с использованием функции приспособленности, селекции, операторы скрещивания, операторы мутации, механизм останова алгоритма (остановка моделирования эволюционного процесса).

В задаче параметрического синтеза аппаратного комплекса ДЗЗ не возникает проблем в кодировании множества потенциальных решений в виде хромосомы. Для этой задачи набор числовых или битовых параметров уже подразумевает определенное представление потенциальных решений в виде строки (хромосомы), к которой могут быть непосредственно применены операторы классического генетического алгоритма с целью получения оптимальных решений. Каждый из m параметров космических систем ДЗЗ, представленный бинарным набором генов, всегда занимает фиксированный участок хромосомы. Так, например, если решению подлежит задача с b_m параметрами, каждый из которых кодируется 4 битами, то хромосома, представленная строкой длиной $4m$ бит, кодирует все возможные потенциальные решения задачи.

Хромосомы генерируются случайным образом для образования начальной популяции сразу в бинарном виде путем случайного заполнения

разрядов (генов) нулями и единицами, например с помощью генератора случайных чисел. Все последующие операторы генетического алгоритма работают с кодом. На этапе селекции с образованием родительских пар происходит вычисление значений функции фитнеса для каждой X_i хромосомы: $FF(X_i)$. Эта операция требует декодирования хромосомы, т. е. перехода от бинарного кода параметров космических систем к их вещественным значениям. Операция декодирования также используется на завершающей стадии поиска, когда требуется «прочитать» оптимальный состав параметров космических систем ДЗЗ.

Селекция хромосом состоит в их отборе и формировании следующей популяции. Селекция является случайным процессом, при котором руководствуются правилом: чем большее значение функции приспособленности имеет данная хромосома, тем выше вероятность ее выбора для репродукции.

Механизм останова алгоритма определяется на этапе его проектирования с учетом естественных ограничений, связанных со временем счета на ЭВМ или с учетом числа популяций, при которых значение функции приспособленности перестает улучшаться. Полученная в результате n итераций хромосома с наибольшим значением функции приспособленности принимается как решение поставленной задачи [20].

Оценка эффективности космических систем ДЗЗ выполняется на основе метода многокритериальной оптимизации с использованием аппарата нечетких множеств [2, 10]. Методика заключается в сравнительном анализе параметров космических систем ДЗЗ и информативных признаков (характеристик) земных процессов и объектов, которые необходимо регистрировать, а также технических характеристик космической системы ДЗЗ, обеспечивающих решение тематических задач. При этом используются алгоритмы [22], основанные на вычислении следующих оценок: функций близости (невязки) S сравниваемых величин (характеристик задач и параметров космической системы); функций соответствия G (оценок, вычисленных для соответствующих функций близости); функций принадлежности F . Функции соответствия являются множеством частных критериальных статистик, описывающих степень совпадения значений ин-

формативных признаков — характеристик тематических задач со значениями параметров космической системы ДЗЗ. Функция принадлежности, используемая в обобщенном критерии для оценки эффективности КГЭМ имеет вид

$$F = \sum_{j=1}^{m(lp)} \rho \cdot G(a'_{jlp}, a_{jlp}). \quad (2)$$

Наибольшего значения функция принадлежности (2) достигает при совпадении значений всех параметров КМ с характеристиками задачи, а наименьшего значения, равного нулю, — когда нет совпадения ни по одному параметру. В этом случае относительная эффективность выполнения программы КГЭМ может быть вычислена по формуле

$$\Theta = \frac{F}{\sum_{p=1}^h \sum_{l=1}^{k(p)} m_{lp}} = \frac{\sum_{p=1}^h \rho_1 \sum_{l=1}^{k(p)} \rho_2 \sum_{j=1}^{m(lp)} \rho_3 \cdot G(a'_{jlp}, a_{jlp})}{\sum_{p=1}^h \sum_{l=1}^{k(p)} m_{lp}}, \quad (3)$$

$$G(a'_{jlp}, a_{jlp}) = [1 - S(a'_{jlp}, a_{jlp})].$$

Здесь $G(a'_{jlp}, a_{jlp})$ и $S(a'_{jlp}, a_{jlp})$ — функция соответствия и функция близости j -го параметра (a'_{jlp}) j -й характеристики l -й задачи p -й подпрограммы (a_{jlp}), ρ — соответствующие весовые коэффициенты важности, h — количество подпрограмм, $k(p)$ — количество задач p -й подпрограммы, $m(lp)$ — количество информативных характеристик l -й задачи p -й подпрограммы.

Оценка экологического состояния геологической среды проводится для обоснования различных организационно-хозяйственных мероприятий, связанных с землепользованием и требующих районирование территорий по геоэкологическому состоянию геологической среды. Эту оценку можно выполнять на основе различных подходов и принципов: морфолого-генетическом, по степени техногенной нагрузки, ландшафтно-системном и др. Суть ландшафтно-системного подхода заключается в анализе природно-техногенной среды (ПТС) как сложной системы с учетом иерархии подсистем — ландшафтных структур, их приоритетов в природной системе и формировании обобщенного критерия классификации ПТС по классам [19].

Используя ландшафтно-системный подход при дешифрировании космических снимков [7],

можно косвенным путем обнаружить те геоэкологические процессы и явления, которые не видны при прямых наблюдениях спектральных яркостных и структурных характеристик изображений. К этим объектам можно отнести участки с существующими и потенциально опасными неблагоприятными экзогенными процессами: эрозии, сдвиги, просадки, зоны интенсивного накопления загрязнений, которые, как правило, тяготеют к определенным типам ЛК. При решении гидроэкологических задач может быть использована взаимосвязь классов ЛК с гидроэкологическими параметрами естественной среды (уровень грунтовых вод, влажность почв, участки возможного подтопления).

Для выполнения поставленной задачи составляется база данных эталонных ПТС, отличающиеся по степени геоэкологической нагрузки, формирующей геоэкологическое состояние региона, на ряд эталонных классов. Каждому классу соответствует определенный набор групп ЛК, характерных для данного геоэкологического состояния, например природные, антропогенно-модифицированные, антропогенные, техногенные [6].

Процедура оценки ПТС происходит в следующей последовательности: по космическим снимкам и тематическим картам определяются относительные площади, занимаемые различными ЛК, на основании которых формируются соответствующие ГЛК и вычисляются их площади. Принятие решения о принадлежности исследуемой ПТС к тому или другому классу выполняется путем последовательного сравнения ГЛК и их площадей в исследуемом регионе с эталонными. Для этой цели вычисляются функции $S_j(b_l)$, характеризующие близость значений характеристик b_l исследуемой ПТС соответствующим параметрам a_{il} эталонных ПТС по каждому l -му параметру:

$$S_i(b_l) = (\bar{a}_{il} - b_l) / \bar{a}_{il} \quad \text{для случая } b_l < \bar{a}_{il};$$

$$S_i(b_l) = (b_l - \bar{a}_{il}) / b_l \quad \text{для случая } b_l > \bar{a}_{il};$$

$$S_i(b_l) = 0 \quad \text{для случая } \bar{a}_{il} \leq b_l \leq \bar{a}_{il}.$$

Далее оценка ПТС может быть формализована как задача многокритериальной оптимизации n критериев, каждый из которых выступает как функция соответствия l -й характеристики исследуемой ПТС l -му параметру (площадям) эта-

лонной ПТС. В качестве обобщенного критерия используется «функция принадлежности», определяющая вероятность принадлежности исследуемой ПТС к каждому эталонному классу. При этом множеством частных критериев являются функции соответствия между относительными площадями исследуемых и эталонных ПТС. Решение о принадлежности ПТС к конкретному классу принимается автоматически по максимальному значению функции принадлежности после решения соответствующих уравнений математической модели ПТС [5].

Рассмотренный ландшафтно-системный подход к геоэкологической оценке ПТС открывает новые возможности для исследования на качественно новом уровне общих тенденций изменений, которые происходят в геоэкосистемах, и может быть использован в комплексном геоэкологическом мониторинге окружающей природной среды.

Прогноз развития экологического состояния геологической среды решается путем моделирования при наличии архивных данных о происходящих процессах в исследуемом регионе. Используя ABC-метод и рассматривая геологическую среду как сложную систему, прогнозируемое состояние можно определить как адаптацию его будущих значений к уже известным из предшествующих наблюдений.

Основой для формирования динамической ABC-модели геологической среды служит уравнение, полученное из условия, что каждый из процессов может быть выражен линейной комбинацией остальных процессов [14]:

$$\frac{dx_i}{dt} = a_{i1}x_1 + a_{i2}x_2 + \dots + a_{is}x_s + \dots + a_{in}x_n - x_i, \quad (4)$$

где x_i — исследуемый процесс; $x_1, x_2, \dots, x_s, \dots, x_n$ — взаимосвязанные процессы, которые влияют на x_i ; a_{is} — коэффициенты уравнений ABC-модели, учитывающие влияние процесса s на процесс i и сохраняющие постоянные значения на выбранном интервале времени.

Процедуру моделирования и прогнозирования покажем на примере оценки и прогнозирования изменений геоэкологического состояния Никопольского горнопромышленного района под влиянием изменяющейся техногенной нагрузки [6].

При исследовании были выделены четыре взаимосвязанных процесса: природный P , антропогенно-модифицированный M , антропогенный A и техногенно-индустриальный T , которые характеризуют изменения геоэкологического состояния геологической среды и позволяют по уровню техногенной нагрузки отнести исследуемую территорию к конкретному классу K . Если принять, что на определенных интервалах времени каждый из процессов может быть выражен линейной комбинацией остальных процессов, то на основе (4) можно составить динамическую ABC-модель геологической среды:

$$\begin{aligned} \frac{dK}{dt} &= a_{KP}P + a_{KM}M + a_{KA}A + a_{KT}T - K, \\ \frac{dP}{dt} &= a_{PM}M + a_{PA}A + a_{PT}T + a_{PK}K - P, \\ \frac{dM}{dt} &= a_{MA}A + a_{MT}T + a_{MK}K + a_{MP}P - M, \quad (5) \\ \frac{dA}{dt} &= a_{AP}P + a_{AK}K + a_{AA}A + a_{AT}T - A, \\ \frac{dT}{dt} &= a_{TK}K + a_{TP}P + a_{TM}M + a_{TA}A - T. \end{aligned}$$

Влияния процессов друг на друга определяются из корреляционных связей, которые отражают статистические связи между процессами.

После определения значений коэффициентов $a_{KP}, a_{KM}, a_{KA}, a_{KT}$ из соответствующей системы уравнений появляется возможность на основе первого уравнения системы (5) смоделировать процесс K для оценки геоэкологического состояния ПТС.

С помощью изложенной выше методики определения значений K была выполнена оценка и прогнозирование геоэкологического состояния геологической среды Никопольского горнопромышленного района за период с 1956 по 2006 гг. [5].

Прогноз развития космических систем ДЗЗ выполняется с использованием системного подхода, а именно метода научно-технологического качественного и количественного предвидения динамики развития различных процессов, технологий и подходов для оценки перспектив развития как мировой экономики в целом, так и перспектив конкретной отрасли [29].

Задача заключается в выборе на ближайшие годы наиболее перспективного сценария развития космических систем ДЗЗ на основе анализа

приоритетных тематических задач ДЗЗ и современных тенденций развития космических систем ДЗЗ. Особенность данного исследования состоит в том, что сценарии развития формулируются на описательном уровне и характеризуются информационной неопределенностью, что не позволяет дать точной оценки процесса развития, а только с определенной степенью возможности реализации. Из этого следует, что для решения задачи выбора перспективного направления развития космических систем ДЗЗ необходимо использовать математический аппарат и методы экспертных оценок, нечетких переменных, теории принятия решений и др. [4]. Методы экспертных оценок — это методы организации работы со специалистами-экспертами и обработки их мнений, которые выражаются, например, по 10-балльной системе [9].

Основные характеристики при групповом экспертном оценивании: обобщенное мнение группы экспертов, степень согласованности мнений экспертов, компетентность экспертов. Если оцениваемые варианты N представить в виде конечного множества V , то каждый вариант космической системы ДЗЗ — $V_n \in V$ будет характеризоваться конечным множеством показателей E_j ($j = 1, \dots, Y$).

Каждый эксперт E_i ($i = 1, \dots, Z$) проводит экспертизу на основе предоставленной ему информации в форме шкалы качественного и количественного оценивания показателей. Оценивание проводится не ранжированием, а с использованием нечетких переменных. Для этого гипотетические значения каждого критерия разбиваются на семь уровней. При этом эксперт должен дать оценку исследуемого варианта решения на каждом уровне значений критерия.

Эксперт независимо выполняет оценивание и не имеет информации об оценках других экспертов. Оценка j -го показателя n -го варианта i -м экспертом определяется для каждого уровня ($s = 1, \dots, 7$) показателя в виде нечеткой переменной $\tilde{K}_{njs}^i = \langle K_{njs}^i, \mu_{njs}^i \rangle$. Оценка показателей для всех вариантов формируется системой экспертного опроса в виде

$$\tilde{K}_{nj}^i = \{ \langle K_{njs}^i, \mu_{njs}^i \rangle \mid n \in N, j \in Y, s = 1, \dots, 7 \},$$

где μ_{njs}^i — оценка i -го эксперта, которая определяет возможность j -го показателя для n -го объекта быть на уровне $s \in S_0$.

Оценка i -м экспертом n -го объекта в целом формируется системой экспертного опроса в виде массива

$$\tilde{K}_n^i = \{ K_{nj}^i; n \in N; j = 1, \dots, Y; i \in Z \};$$

$$i = [1, \dots, Z].$$

Результаты экспертизы n -го объекта всеми экспертами формируются системой экспертного опроса в виде массива

$$\tilde{K}_n = \{ \tilde{K}_n^i; n \in N; i = 1, \dots, Z \}.$$

Задача выбора перспективного варианта сценария развития космической системы ДЗЗ является задачей многокритериальной оптимизации ($x \in X$) по всем критериям. Если предпочтение отдается показателям, наибольшим по модулю, то искомое решение определяется из выражения

$$\max_{x \in X} \left[\sum_{j=1}^n a_j K_j(x) \right],$$

где a_j — вес показателя.

ВЫВОДЫ

Системная методология КГЭМ является общей основой информационной технологии управления устойчивым развитием систем КГЭМ, которая сформирована на основе различных моделей и методик, позволяющих проводить имитационные эксперименты с такими разными объектами, как космическая система ДЗЗ и геологические среды. Информационная технология, выполняющая управление устойчивым развитием системы КГЭМ, обеспечивает получение космической информации ДЗЗ, необходимой для решения тематических задач природопользования с наибольшей эффективностью.

1. Бешенев С. Д., Гурвич Ф. Г. Математико-статистические методы экспертных оценок. — М.: Статистика, 1980.—320 с.
2. Волкович В. Л., Волошин А. Ф., Даргейко Л. Ф. и др. Методы и алгоритмы автоматизированного проектирования сложных систем управления. — Киев: Наук. думка, 1984.—216 с.
3. Демчишин М. Г. Техногенні впливи на геологічне середовище території України. — Київ: Гнозіс, 2004.—155 с.
4. Заде Л. Понятие лингвистической переменной и его применение к принятию приближенных решений. — М.: Мир, 1976.—165 с.

5. Лищенко Л. П., Рябоконеко С. А., Федоровский 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.
6. Лищенко Л. П. Особливості вивчення ландшафтів на основі матеріалів дистанційних зйомок на прикладі Нікопольського промислового вузла // *Нові методи в аерокосмічному землезнавстві*. — Київ: ЦАКДЗ, 1999.—С. 162—164.
7. Лялько В. И., Маринич О. М., Федоровський О. Д. Аерокосмічні дослідження ландшафтних комплексів України // *Укр. географ. журн.*—1994.—№ 4.—С. 38.
8. Моисеев Н. Н. Математические задачи системного анализа. — М.: Наука, 1981.—487 с.
9. Панкратова Н. Д. Математическое обеспечение задач технологического предвидения применительно к отрасли промышленности // *Системні дослідження та інформаційні технології*.—2003.—№ 1.—С. 26—33.
10. Подиновский В. В., Ногин В. Д. Парето-оптимальные решения многокритериальных задач. — М.: Наука, 1982.—328 с.
11. Романов В. Н. Системный анализ. — С-Пб: РИО СЗТУ, 2005.—187 с.
12. Саати Т. Принятие решений. Метод анализа иерархий. — М.: Радио и связь, 1993.—186 с.
13. Саати Т., Кернс К. Аналитическое планирование. Организация систем. — М.: Радио и связь, 1991.—252 с.
14. Тимченко И. Е., Игумнова Е. М. Прогнозирование природных процессов методом адаптивного баланса влияний // *Мор. гидрофиз. журн.*—2004.—№ 5.—С. 53—63.
15. Тимченко И. Е., Игумнова Е. М., Тимченко И. И. Системный менеджмент и Авс-технологии устойчивого развития. — Севастополь: Экокси-гидрофизика, 2000.—224 с.
16. Тимченко И. И., Игумнова Е. М., Тимченко И. Е. Образование и устойчивое развитие. Системная методология. — Севастополь: Экокси-гидрофизика, 2004.—527 с.
17. Уемов А. И. Системный подход и общая теория систем. — М.: Мысль, 1978.—271 с.
18. Федоровский А. Д. Системный подход при проектировании сложной оптической аппаратуры // *Оптико-мех. пром-сть*.—1980.—№ 3.—С. 36—38.
19. Федоровский А. Д. К вопросу дешифрирования космических снимков природных ландшафтов // *Космічна наука і технологія*.—1999.—5, № 5/6.—С. 9—15.
20. 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.
21. Федоровский А. Д., Боднар Е. Н., Якимчук В. Г., Козлов З. В. Оценка эффективности космических систем ДЗЗ на основе метода анализа иерархий // *Космічна наука і технологія*.—2005.—11, № 3/4.—С. 75—80.
22. Федоровский А. Д., Даргейко Л. Ф., Зубко В. П., Якимчук В. Г. Системный подход к оценке эффективности аппаратных комплексов дистанционного зондирования Земли // *Космічна наука і технологія*.—2001.—7, № 5/6.—С. 75—79.
23. Федоровский А. Д., Козлов З. В. Модель усвоения информации ДЗЗ в экологическом мониторинге // *Доповіді НАНУ*.—2004.—№ 11.—С. 134—138.
24. Федоровский А. Д., Суханов К. Ю., Якимчук В. Г. К вопросу оценки космических снимков для дешифрирования природных ландшафтов // *Космічна наука і технологія*.—1999.—5, № 1.—С. 24—31.
25. Федоровский А. Д., Якимчук В. Г. Имитационное моделирование космических исследований ДЗЗ: постановка задачи и пути решения // *Космічна наука і технологія*.—2002.—8, № 2/3.—С. 83—88.
26. Федоровский А. Д., Якимчук В. Г., Козлов З. В., Колоколов А. А. Моделирование и оценка эффективности космических систем зондирования Земли // *Космічна наука і технологія*.—2003.—9, № 2/3.—С. 83—89.
27. Янугш Д. А. Дешифрирование аэрокосмических снимков. — М.: Недра, 1991.—240 с.
28. Committee on Earth Observation Satellites (CEOS). Report of the task force for the CEOS long term plan.
29. Forrester J. W. *Industrial Dynamics*. — Cambridge MA, Productivity Press, 1961.—391 p.
30. Forrester J. W. *Principles of Systems*. — Cambridge MA, Productivity Press, 1968.—320 p.
31. Jones C. Information Capacity of Photographic Films // *J. Opt. Soc. Amer.*—1961.—51, N 11.—P. 1159—1171.

SYSTEM METHODOLOGY OF DEVELOPMENT OF THE SPACE GEOECOLOGICAL MONITORING

A. D. Fedorovsky, H. N. Bodnar, Z. V. Kozlov

Substantiation system methodology for the space geoecologic monitoring environmental assessment of the Earth's surface on the basis of complex consideration of the tasks related to the development of space systems of the remote sensing of Earth and of the problems of technical influence on the geological environment as a result of economic activity.