

УДК 528.8.04

## **СИСТЕМНАЯ МЕТОДОЛОГИЯ КОМПЛЕКСНОГО МОНИТОРИНГА ПРИРОДОПОЛЬЗОВАНИЯ НА ОСНОВЕ КОСМИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ**

**© А.Д. Федоровский, З.В. Козлов, И.А. Чигринец, 2005**

Центр аэрокосмических исследований Земли  
Института геологических наук НАН Украины, г. Киев

Обґрунтовується системна методологія моніторингу природокористування з використанням космічної інформації ДЗЗ на основі комплексного розгляду задач, пов'язаних з розвитком космічних систем дистанційного зондування Землі, аналізом попиту на КІ ДЗЗ, оцінкою перспективності пошуку корисних копалин і моделюванням розвитку геоecологічного стану в досліджуваних регіонах.

Обосновывается системная методология мониторинга природопользования с использованием космической информации ДЗЗ на основе комплексного рассмотрения задач, связанных с развитием космических систем дистанционного зондирования Земли, анализом спроса на КИ ДЗЗ, оценкой перспективности поиска полезных ископаемых и моделированием развития геоecологической обстановки в исследуемых регионах.

System methodology of nature management monitoring with the use of remote sensing space information is substantiated on the base of complex consideration of the tasks which related with development of the space systems of remote sensing of the Earth, demand analysis for remote sensing space information, estimation of minerals prospecting availability and simulation of geoecological environment development in studied regions.

Для обеспечения эффективного функционирования комплексного мониторинга природопользования (МП) на основе космической информации (КИ) дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) необходимо не только выполнять регулярное наблюдение земной поверхности, но и использовать такие новые функциональные возможности, как моделирование и прогноз развития геоecологической обстановки, оценка перспективности поиска полезных ископаемых на исследуемых участках территории, выбор параметров и оценка эффективности космических систем (КС) ДЗЗ и др.

Цель данной статьи - обоснование системной методологии [1] повышения эффективности функционирования МП на основе взаимосвязанного комплексного анализа задач природопользования и проблем управления информационно-техническим развитием КС ДЗЗ.

На основе разработанных методик и моделей [2-9] была сформирована структура системной методологии мониторинга (рис. 1), раскрывающая последовательность действий от «концепции развития мониторинга» к системе «мониторинга природопользования».

Как видно из приведенной схемы, системная методология МП является общей основой информационной технологии мониторинга природопользования, которая сформирована на основе различных моделей и методик.

*Оценка спроса на КИ МП* или определение потенциальных потребителей КИ 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 [10, 11], который позволяет сформировать

необходимую целевую функцию и оценить с помощью экспертов степень влияния на нее каждого показателя исследуемой системы.



Рис. 1. Структура системной методологии мониторинга природопользования (МП) на основе космической информации (КИ) ДЗС

Основная проблема использования метода анализа иерархий - это последовательная декомпозиция целевой функции на более простые критериальные составляющие - показатели, объединяемые в соответствующие иерархические уровни. Когда проблема представлена иерархически, составляется матрица для сравнения влияния видов информации первого уровня иерархии на нулевой уровень соответственно указанной шкале преимуществ. Подобные матрицы должны быть построены для парных сравнений каждой альтернативы на втором уровне относительно первого уровня и т.д. Элементы матриц заполняются оценками, суждениями эксперта или их группы об относительной важности сравниваемых отдельных элементов относительно цели, или критерия, определенного на более высоком уровне соответственно принятой выше шкале оценок.

Метод анализа иерархий разрешает сконструировать необходимую целевую функцию и оценить степень влияния на нее каждой из характеристик исследуемой системы. Если получены все необходимые весовые коэффициенты, то формула свертки обобщенного критерия для сравниваемых вариантов имеет вид

$$F = \sum_{\ell} K_{\ell}^1 \sum_m K_m^2 \sum_r K_r^3 \sum_c K_c^4 \times X_c^b,$$

где  $K$  - векторы локальных приоритетов, верхний индекс которых обозначает уровень иерархии, а нижний – индекс суммирования на соответствующем уровне;

$x_c^b$  - коэффициент преимущества варианта  $c$  по показателю  $b$ .

Вычисляя значения  $F$  для различных тематических задач, можно определить относительный спрос космической информации ДЗЗ. Так, в результате проведенного эксперимента для космического аппарата типа «Січ» наибольшие значения обобщенного критерия, а следовательно и востребованность космической информации ДЗЗ, были получены для задач сельского хозяйства и чрезвычайных ситуаций.

*Модель процесса усвоения КИ в МП* создается с использованием метода адаптивного баланса влияний – Adaptive Balance of Causes (ABC-метод) [12], в основе которого лежит метод системной динамики Д. Форрестора [13]. 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.

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 компонент вектора состояния МП и динамическое равновесие системы. После построения системной диаграммы появляется возможность записать динамические уравнения модели в явном виде. Используя полученную систему динамических уравнений и задавая начальный вид 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 функций влияния уточняется в процессе модельного эксперимента.

Концептуальная модель усвоения КИ включает уровни, которые отображают объем продукции (информации), получаемой с помощью МП, объем используемой информации, объем плановых затрат на мониторинг и на внедрение информации, уровни качества мониторинга и потребности в информации мониторинга, себестоимость и цену выполнения мониторинга, усилия на внедрение информации, производительность труда, прибыль от выполнения мониторинга, оплату труда исполнителям мониторинга, профессиональный уровень операторов и затраты на подготовку операторов.

В работе [14] приведены результаты моделирования МП, из которых следует, что на первом этапе при непрерывном увеличении затрат, направленных на внедрение КИ в МП, вопреки ожидаемому росту объемов продукции мониторинга наблюдалась обратная реакция - выпуск продукции падает. После определенного времени использование КИ в МП приводит к заметному росту производительности труда и соответственно к росту производства. Плановый объем продукции мониторинга восстанавливается и продолжает возрастать вместе с ростом производительности труда.

Полученный сценарий развития процесса внедрения КИ в МП является результатом сложных нелинейных взаимодействий внутри системы. Наблюдаемое в начальный период

падение объема продукции мониторинга и прибыли от ее реализации, является результатом сокращения плановых затрат на выполнение мониторинга за счет их частичного отвлечения на затраты, связанные с внедрением КИ МП. После срабатывания усилий, направленных на усвоение информации МП, за счет последней повышается производительность мониторинга, прекращается падение, а со временем и постепенное повышение объема производимой продукции мониторинга и прибыли от ее реализации. Это явление получило название “парадокс усовершенствования”, на который в рассматриваемом случае влияют: связь использования информации МП с качеством мониторинга, уровень профессиональной подготовки производственных кадров, давление производственного плана и т.д.

*Анализ тематических задач ДЗЗ* основан на информационных материалах Комитета спутникового наблюдения Земли, (CEOS - Committee on Earth Observation Satellites), членом которого с 1993 г. является Украина, а также оценки возможностей использования данных ДЗЗ при решении различных тематических задач природопользования и хозяйственной деятельности [15].

*Концептуальная модель* экологического состояния природной среды отражает причинно-следственные связи в эколого-экономической системе и включает уровни, которые отображают объем производства, объем потребления природных ресурсов, экологическое состояние геологической среды, техногенную нагрузку на геологическую среду, природно-охранные мероприятия, ограничение потребления природных ресурсов, рентабельность производства, экологический штраф и ресурсную ренту, себестоимость продукции и спрос 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.

*Динамическая модель* создается на основе причинно-следственных связей концептуальной модели и включает формирование системной диаграммы, в которой для уровней введены потоки и цепочки обратных связей. Системная диаграмма экологического состояния природной среды должна содержать для каждого из уровней внутрисистемные связи с обозначением соответствующих функций влияния. Через функции влияния осуществляется связь с распределенными в пространстве и времени полями характеристик природной среды. Поэтому в общем случае они являются функциями координат и времени. Системные связи или функции влияния должны быть определены непосредственно по данным наблюдений или заданы экспертами.

Формализованная системная диаграмма в виде динамико-стохастической модели экологического состояния природной среды представляет собой прогностическую модель эколого-экономической системы, которая позволяет прогнозировать экосостояние при заданных начальных условиях, известных функциях влияния и отсутствии внешних воздействий.

*Оценка экологического состояния природной среды* выполняется на основе различных подходов и принципов: морфолого-генетическом, ландшафтно-системном, по степени техногенной нагрузки 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 [16].

Используя ландшафтно-системный подход при дешифрировании космических снимков, 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 загрязнения, 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, отличающихся 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 [17].

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  $S_i(b_\ell)$ , характеризующие близость значений характеристик  $(b_\ell)$  исследуемой ПТС, соответствующим параметрам  $(a_{i\ell})$  эталонных ПТС по каждому  $\ell$ -му параметру

$$S_i(b_\ell) = (\bar{a}_{i\ell} - b_\ell) / \bar{a}_{i\ell}, \text{ для случая } b_\ell < \bar{a}_{i\ell};$$

$$S_i(b_\ell) = 0, \text{ для случая } \bar{a}_{i\ell} \leq b_\ell \leq \underline{a}_{i\ell};$$

$$S_i(b_\ell) = (b_\ell - \bar{a}_{i\ell}) / b_\ell, \text{ для случая } b_\ell > \bar{a}_{i\ell}.$$

Далее оценка ПТС может быть формализована как задача многокритериальной оптимизации  $n$  критериев, каждый из которых выступает как функция соответствия  $\ell$ -й характеристики  $(b_\ell)$  исследуемой ПТС  $\ell$ -му параметру (площадям)  $(a_{i\ell})$  эталонной 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» — оценки 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 [17].

Проблема *оценки перспективности поиска полезных ископаемых* на исследуемых участках территории заключается в том, что решение принимается на основе учета многих информативных признаков.

Рассматривая природную среду как сложную систему, можно использовать общий методический принцип и математический аппарат системного анализа [18].

При исследованиях на региональном уровне предлагается применить рассмотренный выше метод анализа иерархий. В этом случае система приоритетов может быть представлена в виде схемы, состоящей из пяти уровней. На первом уровне находится целевая установка - системная оценка перспективности поиска полезных ископаемых по данным ДЗЗ и наземным наблюдениям. Второй уровень состоит из разных источников информации, которая используется для анализа исследуемых участков: космические снимки в разных спектральных диапазонах, разнообразный картографический материал, геофизическая и геологическая информация и т.д. Третий уровень включает естественные явления, которые, так или иначе, являются источником информативных признаков, используемых для оценки перспективности поиска полезных ископаемых на исследуемых участках: поля яркости и цвета, температурные поля, нетектонические образования, структурно-геоморфологические элементы и др. На четвертом уровне находятся методы анализа элементов предыдущего уровня: оптический и структурно-текстурный спектральный анализ, морфометрический и морфоструктурный анализ, геофизические, химические и биологические методы. Пятый уровень состоит из перечня информативных признаков (оптические, температурные, радио, геофизические и геологические), относительные значения которых на каждом исследуемом участке определяются по балльной шкале.

Вычисляя значения  $F$  для каждого исследуемого участка территории можно определить их приоритетность для последующей детальной классификации.

Многолетняя практика дистанционных исследований показала, что существует определенная связь между наличием в геологических структурах полезных ископаемых ( $P$ ) и такими физическими характеристиками, как: спектральные оптические ( $O$ ), тепловые ( $T$ ) и радио ( $R$ ) информативные признаки земной поверхности, геологические ( $G$ ) особенности региона и другие признаки [19], которые уверенно дешифрируются на космических снимках.

Это обстоятельство позволяет для детальной оценки перспективности поиска полезных ископаемых на отдельных площадях на втором этапе исследований использовать метод адаптивного баланса влияний. Особенно важным является то, что АВС-модель позволяет прогнозировать перспективность поиска полезных ископаемых по экспертным прогнозам развития процессов, например  $O$ ,  $T$ ,  $R$ ,  $G$  и др., используя для этого космические снимки и топографические карты.

Если принять, что на определенных участках каждый из процессов  $P$ ,  $O$ ,  $T$ ,  $R$ ,  $G$  может быть выражен линейной комбинацией нескольких процессов, то можно составить динамическую АВС-модель оценки перспективности поиска полезных ископаемых [20, 21]. Модель будет использована для детальной оценки приоритетности отобранных отдельных площадок для последующей геофизической разведки [21].

$$\frac{dP}{dt} = a_{PO}O + a_{PT}T + a_{PR}R + a_{PG}G - P, \quad (1)$$

$$\frac{dO}{dt} = a_{OT}T + a_{OR}R + a_{OG}G + a_{OP}P - O,$$

$$\frac{dT}{dt} = a_{TR}R + a_{TG}G + a_{TP}P + a_{TO}O - T,$$

$$\frac{dR}{dt} = a_{RG}G + a_{RP}P + a_{RO}O + a_{RT}T - R,$$

$$\frac{dG}{dt} = a_{GP}P + a_{GO}O + a_{GT}T + a_{GR}R - G,$$

где  $a_{is}$  – коэффициенты уравнений ABC-модели (далее - коэффициенты), которые учитывают взаимное влияние процессов.

После определения значений коэффициентов, появляется возможность на основе первого уравнения системы (1) выполнить моделирование процесса Р, для оценки перспективности поиска полезных ископаемых.

Данный подход к оценке перспективности поиска полезных ископаемых был реализован в ЦАКИЗ ИГН НАН Украины программно. С его помощью были выполнены исследования нефтегазоперспективности ряда участков нефтегазонасной территории и определены наиболее перспективные из них для выполнения детального исследования на основе геофизической разведки.

*Прогноз развития экологического состояния природной 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 [12]

$$\frac{dx_i}{dt} = a_{i1}x_1 + a_{i2}x_2 + \dots + a_{is}x_s + \dots + a_{in}x_n - x_i \quad (2)$$

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 изменяющейся техногенной нагрузки под действием четырех взаимосвязанных процессов: Р, М, А и Т, которые характеризуют изменения геоэкологического состояния и позволяют по уровню техногенной нагрузки относить исследуемую территорию к конкретному классу (К).

Если принять, что на определенных интервалах времени каждый из процессов К, Р, М, А, Т может быть выражен линейной комбинацией остальных процессов, то можно составить динамическую АВС-модель природной среды по аналогии с (1).

Влияния процессов друг на друга определяются из корреляционных связей, которые отражают статистические связи между процессами: К, Р, М, А, Т.

После определения всех значений коэффициентов  $a_{KP}, a_{KM}, a_{KA}, a_{KT}$ , из соответствующей системы уравнений появляется возможность на основе первого уравнения системы (3) выполнить моделирование процесса К, для оценки геоэкологического состояния ПТС в бальной системе от 1 до 7.

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.

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

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

Динамическая модель КС ДЗЗ создается на основе причинно-следственных связей концептуальной модели. В работах [6, 7] приведены математическая модель КС ДЗЗ, построенная на основе АВС-метода, и результаты моделирования по имитации динамики поведения КС ДЗЗ при различных воздействиях на ее уровни.

*Параметрический синтез аппаратного комплекса (АК) КС 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 АК являются их значения, полностью совпадающие со значениями информативных признаков, регистрируемых на земной поверхности. Однако, в случае выполнения научно-прикладной программы, включающей различные тематические задачи, эти параметры АК, вероятнее всего, не будут оптимальны для регистрации всего множества информативных признаков. Поэтому задача состоит в определении компромиссного варианта значений параметров АК, которые позволят обеспечить выполнение всех тематических задач программы ДЗЗ с наибольшей эффективностью. С этой целью составляется морфологический блок вариантов

значений параметров АК, 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 АК.

Анализ числа вариантов показывает, что при нахождении искомого состава АК ДЗЗ путем прямого перебора, число возможных вариантов становится чрезвычайно велико и эта задача в таком исполнении становится непосильной. Очевидно, что для проектирования современных АК ДЗЗ требуется поиск принципиально новых информационных подходов.

Для решения поставленной задачи был избран генетический алгоритм (ГА), 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). ГА – адаптивный поисковый алгоритм, основанный на эволюционных эмпирических факторах получения решения, что для рассматриваемого случая параметрического синтеза сводится к нахождению оптимальных значений параметров АК ДЗЗ для решения всего множества планируемых тематических задач программы ДЗЗ. Эволюционные факторы в ГА 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 ГА используют соответствующие операторы и механизмы: генерации начальной популяции, оценки качества хромосомы с использованием функции приспособленности, селекции, операторы скрещивания, операторы мутации, механизм останова ГА (остановка моделирования эволюционного процесса).

В задаче параметрического синтеза АК 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 ГА с целью получения оптимальных решений. Каждый из  $m$  параметров КС 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  $4m$  битов, 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 ГА 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 КС к их вещественным значениям. Операция декодирования также используется на завершающей стадии поиска, когда требуется “прочитать” оптимальный состав параметров КС 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 [22].

Оценка эффективности КС ДЗЗ выполняется на основе метода многокритериальной оптимизации с использованием аппарата нечетких множеств [23, 24]. Методика заключается в сравнительном анализе параметров КС ДЗЗ и информативных признаков (характеристик) земных процессов и объектов, которые необходимо регистрировать, а также технических характеристик КС ДЗЗ, обеспечивающих решение тематических задач. При этом используются алгоритмы [5], основанные на вычислении следующих оценок: функций близости (невязки) сравниваемых величин (характеристик задач и параметров КС) –  $S$ ; функций соответствия –  $G$  (оценок, вычисленных для соответствующих функций близости); функций принадлежности –  $F$ . Функции соответствия являются множеством частных критериев, описывающих степень совпадения значений информативных признаков – характеристик тематических задач со значениями параметров КС ДЗЗ. Функция принадлежности, используемая в качестве обобщенного критерия для оценки эффективности МП, имеет вид

$$F = \sum_{j=1}^{m(\ell p)} \rho \cdot G(a'_{j\ell p}, a_{j\ell p}). \quad (3)$$

Наибольшего значения функция принадлежности (3) достигает при совпадении значений всех параметров МП с характеристиками задачи, а наименьшего значения, равного нулю, когда нет совпадения ни по одному параметру. В этом случае относительная эффективность выполнения программы МП может быть вычислена по формуле

$$\Theta = \frac{F}{\sum_{p=1}^h \sum_{\ell=1}^{k(p)} m_{\ell p}} = \frac{\sum_{p=1}^h \rho_1 \sum_{\ell=1}^{k(p)} \rho_2 \sum_{j=1}^{m(\ell p)} \rho_3 \cdot G(a'_{j\ell p}, a_{j\ell p})}{\sum_{p=1}^h \sum_{\ell=1}^{k(p)} m_{\ell p}}, \quad (4)$$

где  $G(a'_{j\ell p}, a_{j\ell p})$  - функция соответствия  $j$ -го параметра ( $a'_{j\ell p}$ )  $j$ -й характеристики  $\ell$ -й задачи  $p$ -й подпрограммы ( $a_{p\ell j}$ ),

$\rho$  - соответствующие весовые коэффициенты важности,

$h$  - количество подпрограмм,

$k(p)$  - количество задач  $p$ -й подпрограммы,

$m(\ell p)$  – количество информативных характеристик  $\ell$ -й задачи  $p$ -й подпрограммы.

$$G(a'_{j\ell p}, a_{j\ell p}) = [1 - S(a'_{j\ell p}, a_{j\ell p})],$$

где  $S(a'_{j\ell p}, a_{j\ell p})$  – функция близости для  $j$ -го параметра ( $a'_{j\ell p}$ ) к  $j$ -й характеристике  $\ell$ -й задачи  $p$ -й подпрограммы ( $a_{p\ell j}$ ).

*Прогноз развития КС ДЗЗ* выполняется с использованием системного подхода, а именно метода научно-технологического предвидения – 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 [25].

Задача заключается в выборе на ближайшие годы наиболее перспективного сценария развития КС ДЗЗ на основе анализа приоритетных тематических задач ДЗЗ и современных тенденций развития КС ДЗЗ. Особенность данного исследования состоит в том, что сценарии развития формулируются на описательном уровне и характеризуются информационной неопределенностью, что не позволяет дать точную оценку процесса развития, а только с определенной степенью возможности реализации. Из этого следует, что для решения задачи выбора перспективного направления развития КС ДЗЗ, необходимо использовать математический аппарат и методы экспертных оценок, нечетких переменных, теории принятия решений и др. [26]. Методы экспертных оценок – это методы организации работы со специалистами-экспертами и обработки их мнений, которые выражаются, как в количественной, так и в качественной форме, например, по 10-балльной системе [27].

Основными характеристиками при групповом экспертном оценивании являются следующие: обобщенное мнение группы экспертов, степень согласованности мнений экспертов, компетентность экспертов. Если оцениваемые варианты ( $N$ ) представить в виде конечного множества  $V$ , то каждый вариант КС ДЗЗ –  $V_n \in V$  будет характеризоваться конечным множеством показателей (критериев) –  $K$ ,  $\hat{E} = \{\hat{E}_j \mid j = \overline{1, Y}\}$ .

Каждый эксперт  $E_i \in E$ ,  $E = \{E_i \mid i = \overline{1, Z}\}$  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 градации начиная от особо низкого и заканчивая особо высоким. При этом эксперт должен дать оценку исследуемого варианта решения задачи 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  $s \in S$ ,  $S = [1, 7]$  значениям показателя в виде нечеткой переменной  $\tilde{K}_{njs}^i = \langle K_{njs}^i, \mu_{njs}^i \rangle [1, 7]$ . Оценка показателей для всех вариантов формируется системой экспертного опроса в виде

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

где  $\mu_{njs}^i$  - 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

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

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

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

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

$$\max_{x \in X} \left[ \sum_{j=1}^n a_j K_j(x) \right], \text{ где } a_j - \text{ вес показателя.}$$

Использование системной методологии для повышения эффективности МП на основе новых методик, позволяющих проводить имитационные эксперименты с такими сложными системами, как КС ДЗЗ и природная среда, потребовало решения задач различной физической природы. Так, для КС ДЗЗ проблема заключалась в исследовании новых информативных признаков объектов, явлений и процессов на земной поверхности, постоянном усовершенствовании параметров КС ДЗЗ, моделировании функционирования КС ДЗЗ, оценки спроса и эффективности использования КИ ДЗЗ. Для задач природопользования было актуальным разработка на основе использования космической информации ДЗЗ методик определения перспективности поиска полезных ископаемых, оценки техногенной нагрузки и риска возникновения кризисных ситуаций.

### Литература

1. Згуровский М.З., Панкратова Н.Д. Системный анализ. - К.: Наукова думка, 2005. - 743 с.
2. Федоровский А.Д. Системный подход при проектировании сложной оптической аппаратуры // Оптико-механическая промышленность. - 1980. - №3. - С. 36-38.
3. Федоровский А.Д., Суханов К. Ю., Якимчук В.Г. К вопросу оценки космических снимков для дешифрирования природных ландшафтов // Космічна наука і технологія. - 1999. - Т 5. №1. - С. 24-31.
4. Федоровский А. Д. К вопросу дешифрирования космических снимков природных ландшафтов. // Космічна наука і технологія. - 1999. - Т5. №5/6. - С. 9-15).
5. Федоровский А. Д., Даргейко Л. Ф., Зубко В. П., Якимчук В. Г. Системный подход к оценке эффективности аппаратурных комплексов дистанционного зондирования Земли // Космічна наука і технологія. - 2001. -Т. 7. № 5/6. - С. 75-79.
6. Федоровский А. Д., Якимчук В. Г. Имитационное моделирование космических исследований ДЗЗ: постановка задачи и пути решения. // Космічна наука і технологія. - 2002. - Т 8. № 2/3. - С. 83-88.
7. Федоровский А.Д., Якимчук В.Г., Козлов З.В., Колоколов А.А. Моделирование и оценка эффективности космических систем зондирования Земли // Космічна наука і техн. - 2003. - Т9. №2/3. - С.83-89.

8. Федоровский А.Д., Артюшенко М.В., Козлов З.В. Параметрический синтез космических систем зондирования Земли на основе генетического метода // *Космічна наука і технологія*. - 2004. - Т10. №1. - С. 54-60.
9. 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. – Т11. №3/4. – С.75-80.
10. Саати Т., Кернс К. Аналитическое планирование. Организация систем. – М.: Радио и связь, 1991. – 252с.
11. Саати Т. Принятие решений. Метод анализа иерархий. - М.: Радио и связь, 1993. - 186 с.
12. Тимченко И. Е., Игумнова Е. М., Тимченко И. И. Системный менеджмент и АВС-технологии устойчивого развития. - Севастополь: Изд. «Экоси-гидрофизика», 2000. – 224 с.
13. Forrester J.W. *Industrial Dynamics*. Cambridge MA: Productivity Press, 1961. – 391 p.
14. Федоровский А. Д., Козлов З. В. Модель усвоения информации ДЗЗ в экологическом мониторинге // *Доповіді НАНУ*. - 2004. - № 11. - С.134-138.
15. Committee on Earth Observation Satellites (CEOS). Report of the task force for the CEOS long term plan.
16. Ліщенко Л.П., Федоровський О.Д., Якимчук В.Г. Ландшафтно-системний підхід до оцінки і прогнозування геоекологічного стану природно-техногенних систем // *Геоінформатика*. – 2005. - № 2. С. 53-58.
17. Ліщенко Л. П. Особливості вивчення ландшафтів на основі матеріалів дистанційних зйомок на прикладі Нікопольського промислового вузла // *Нові методи в аерокосмічному землезнавстві*. - К.: ЦАКДЗ, 1999. - С. 162-164.
18. Лялько В. И., Маринич О. М., Федоровский О. Д. Аэрокосмические исследования ландшафтных комплексов Украины // *Український географічний журнал*. – 1994. - №4. - С.3-8.
19. 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.
20. Перерва В.М., Лялько В.И., Костюченко Ю. В. Прямой поиск залежей нефти и газа дистанционными методами. – К.: 1995. – 124 с. (Препр. / НАН Украины. ЦАКИЗ ИГН)
21. Тимченко И. Е. Игумнова Е. М. Прогнозирование природных процессов методом адаптивного баланса влияний // *Мор. гидрофиз. журн.* - 2004. - №5. - С. 53-63.
22. А.Д. Федоровский, М.В. Артюшенко, З.В. Козлов Параметрический синтез космических систем зондирования Земли на основе генетического метода // *Космічна наука і технологія*. - 2004. – Т.10. №1. - С. 54-60.
23. 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.
24. Подиновский В. В., Ногин В.Д. Парето-оптимальные решения многокритериальных задач.- М.: Наука, 1982. - 328 с.
25. Форрестер Дж. *Мировая динамика*. – М.: Наука, 1978. – 167с.
26. Заде Л. Понятие лингвистической переменной и его применение к принятию приближенных решений. – М.: МИР, 1976. – 165 с.
27. Панкратова Н. Д. Математическое обеспечение задач технологического предвидения применительно к отрасли промышленности // *Системні дослідження та інформаційні технології*. - 2003. - №1. – С. 26-33.