

СИСТЕМНАЯ КОНЦЕПЦИЯ РАЗВИТИЯ КОСМИЧЕСКОГО ГЕОМОНИТОРИНГА

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

Научный центр аэрокосмических
исследований Земли ИГН НАН Украины
г. Киев, ул. О.Гончара, 55-Б
E-mail: fedorovsky@casre.kiev.ua

В статье на основе комплексного рассмотрения задач, связанных с развитием космических систем дистанционного зондирования Земли и проблем оценки экологического состояния природной среды, обосновывается системная методология космического геоэкологического мониторинга.

Современные космические системы (КС) дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) с более высокими информационно-техническими параметрами позволяют получать разноплановые космические снимки с высоким пространственным и спектральным разрешением. Для более эффективного их использования в новых информационных технологиях необходим комплексный системный подход.

Цель данного исследования – обоснование системной концепции развития космического геомониторинга (КГМ), органически связывающей задачи управления устойчивым развитием КС ДЗЗ и проблемы оценки экологического состояния природной среды, рационального природо- и недропользования.

Проблема информационно-технического развития космического геомониторинга ДЗЗ состоит в следующем:

- исследование информативных признаков экологического состояния природной среды и разработка методов их дешифрирования;

- развитие нового направления в ДЗЗ – системной оценки информационной эффективности и моделирования КС ДЗЗ.

Для оценки экологического состояния природной среды актуально решение следующих задач:

- разработка на основе космической информации (КИ) 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 КИ ДЗЗ.

На рисунке 1 представлена структура системной методологии КГМ от «концепции развития КГМ» до «информационной технологии управления развитием КГМ», комплексно рассматривающей процесс управления устойчивым информационно-техническим развитием КС ДЗЗ и проблему оценки экологического состояния природной среды.

Ниже раскрывается содержание основных модулей структурной схемы.

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 возможностей использования данных ДЗЗ при решении тематических задач природопользования и хозяйственной деятельности.

Выбор и оценка космических снимков для КГМ основаны на анализе как оптических спектральных, так и структурно-текстурных характеристик изображений. Уже в ранних работах по дешифрированию аэрокосмических изображений природных ландшафтов была показана значимость плановой структуры и текстуры изображений, 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 смежных вероятностей, параметров Харалика и др.

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 было замечено, что не всегда лучший по разрешению снимок обеспечивал более высокий уровень распознаваемости объектов.

В работе [1] приведены результаты физического и компьютерного исследования,

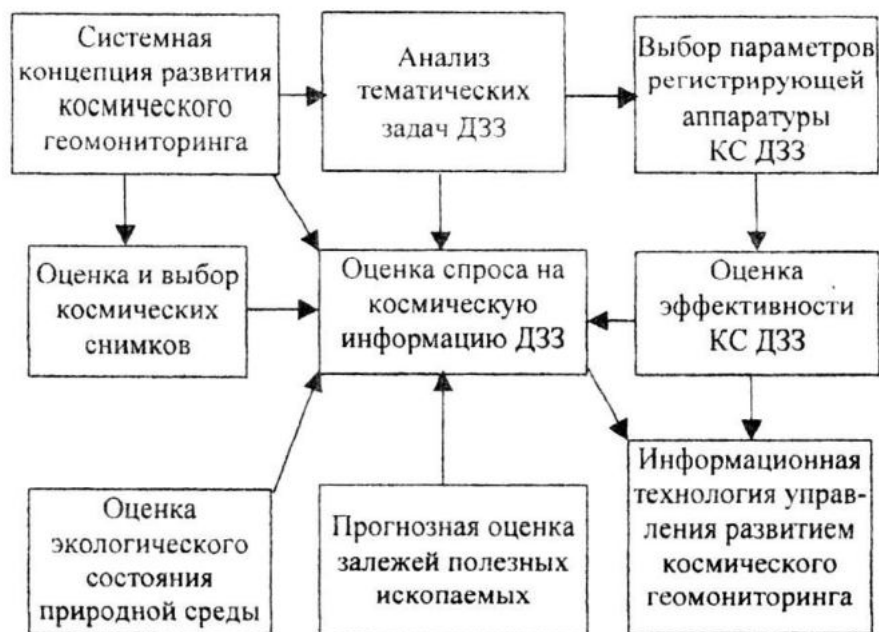


Рисунок 1 – Структура системной методологии формирования информационной технологии управления устойчивым развитием космического геомониторинга

которые показали, что критерий, сформированный как логарифмическое отношение сигнала к шуму в пространственно-частотной области спектра, имеет наибольшую корреляцию с вероятностью дешифрирования изображений различных моделей, чем традиционные критерии.

Оценка спроса на КИ КГМ 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 [2], 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 иссле-

дуемого 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.

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_l^1 , K_m^2 , K_r^3 и K_p^4) соответствующих уровней.

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

$$F = \sum K_l^1 \sum K_m^2 \sum K_r^3 \sum K_p^4 \cdot X_p^s, \quad (1)$$

где верхний индекс критериального приоритета обозначает номер уровня иерархии;

l, m, r, d – порядковый номер компонент вектора; X_p^s – коэффициент предпочтительности варианта s по показателю p .

В результате проведенного эксперимента для космического аппарата типа «Сич» наибольшие значения обобщенного критерия, а следовательно и востребованность космической информации, были получены при решении задач сельского хозяйства и чрезвычайных ситуаций.

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.

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

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 (хромосома), 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 $4 \cdot m$ 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 [3].

Оценка экологического состояния природной среды происходит в следующей последовательности: по космическим снимкам определяются относительные площади,

заняты, например, тепловыми аномалиями на водной поверхности. Принятие решения о принадлежности исследуемой участка территории к тому или иному экологическому классу выполняется путем последовательного сравнения исследуемых в регионе площадей с эталонными. Для этой цели вычисляются функции $S_i(b_l)$, характеризующие близость значений характеристик (b_l) исследуемой площади с соответствующими параметрами (a_{il}) эталонных по каждому l -му параметру

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

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

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

Далее оценка может быть формализована как задача многокритериальной оптимизации l критериев, каждый из которых выступает как функция соответствия l -й характеристики (b_l) исследуемой площади l -му параметру (площадям) (a_{il}) эталонного участка. В качестве обобщенного критерия используется «функция принадлежности», определяющая вероятность принадлежности исследуемой площади к каждому эталонной классу. При этом множество частных критериев являются «функции соответствия» — оценки соответствия между относительными площадями исследуемых и эталонных участков. Решение о принадлежности исследуемой площади к конкретному классу принимается автоматически по максимальному значению функции принадлежности.

Прогнозная оценка залежей полезных ископаемых для последующей геофизической разведки выполняется на основе анализа космических изображений исследуемой территории по множеству информативных признаков.

Для выполнения этой задачи используется метод адаптивного баланса влияний - *Adaptive Balance of Causes* (АВС-метод) [4]. Последний позволяет моделировать и прогнозировать развитие сложных систем и выполняет вычислительные функции с учетом взаимодействия всех модулей, каждый из которых находится в состоянии динами-

ческого равновесия. Равновесие поддерживается функциями влияния, связывающими данный модуль с другими модулями системы. Технология применения АВС-метода для поиска полезных ископаемых предусматривает наличие статистических или архивных данных результатов предыдущих исследований на региональном уровне, которые обеспечивают вычисление коэффициентов влияния для соответствующих уравнений АВС-модели.

В течение многолетней практики дистанционных исследований установлено существование определенной связи между наличием в геологических структурах полезных ископаемых - P и такими информативными признаками земной поверхности, как: спектральная яркость отраженного излучения в видимом оптическом диапазоне (O) и собственное излучение земной поверхности в инфракрасном диапазоне оптического спектра (T), излучение в радио диапазоне (R) и геологические информативные признаки (G), связанные с особенностями исследуемого региона. Располагая КИ ДЗЗ и топографическими картами исследуемой территории с помощью АВС-метода можно прогнозировать наличие месторождения P путем интегральной оценкой процессов O, T, R, G .

Уравнение АВС-метода для описания процессов в геосистеме, полученное при условии, что каждый из процессов может быть выражен линейной комбинацией остальных процессов, имеет следующий вид [5]:

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

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 влияния уравнений АВС-модели, учитывающие влияние процесса s на процесс i и сохраняющие постоянные значения на выбранном отрезке исследуемой территории. Уравнение (2) является основой для формирования динамической АВС-модели оценки недроперспективности и приоритетности

исследуемых участков для последующей детальной геофизической разведки.

После определения коэффициентов влияния, появляется возможность на основе системы уравнений выполнить моделирование процесса P , для оценки недроперспективности участков исследуемой территории.

Оценка эффективности КС ДЗЗ выполняется на основе метода многокритериальной оптимизации с использованием аппарата нечетких множеств. 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, 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 КС ДЗЗ имеет вид:

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

где $G(a'_{jlp}, a_{jlp})$ – функция соответствия j -го параметра (a'_{jlp}) j -й характеристики l -й задачи p -й подпрограммы (a_{jlp}), ρ – соответствующие весовые коэффициенты важности, $m(l_p)$ – количество информативных характеристик l -й задачи p -й подпрограммы.

Наибольшего значения, функция принадлежности достигает при совпадении значений всех параметров КС с характеристиками задачи, а наименьшего значения, равного нулю, когда нет совпадения ни по одному параметру. В этом случае относи-

тельная эффективность КС ДЗЗ может быть вычислена по формуле:

$$\mathcal{E} = \frac{F}{\sum_{p=1}^h \sum_{l=1}^{k(p)} m_{lp}} \quad (4)$$

где h – количество подпрограмм, $k(p)$ – количество задач p -й подпрограммы.

Заключение. Системная методология является общей основой информационной технологии управления устойчивым развитием космического геомониторинга, которая формируется на основе различных моделей и методик, позволяющих проводить имитационные эксперименты с такими разными объектами как космические системы ДЗЗ и природные среды. Выполняя управление устойчивым развитием системы геомониторинга, информационная технология обеспечивает получение космической информации дистанционного зондирования Земли, необходимой для решения тематических задач природопользования с наибольшей эффективностью.

ЛИТЕРАТУРА

1. А.Д. Федоровский, К.Ю. Суханов, В.Г. Якимчук. К вопросу оценки космических снимков для дешифрирования природных ландшафтов // Космічна наука і технологія, 1999, Т. 5, № 1. – С. 24–31.
2. Т. Саати, К. Кернс. Аналитическое планирование. Организация систем. – Москва: «Радио и связь», 1991. – 252 с.
3. 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.
4. И.Е. Тимченко, Е.М. Игумнова, И.И. Тимченко. Системный менеджмент и АВС-технологии устойчивого развития. – Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2000. – 225 с.
5. И.Е. Тимченко, Е.М. Игумнова. Прогнозирование природных процессов методом адаптивного баланса влияний // Морской гидрофизический журнал, 2004, № 5, – С. 53–63.