

Информационная формализация планирования оптимальных маршрутов навигационного контроля в экологическом мониторинге

Г.А. Гусейнов, А.А. Ганбаров, Р.Х. Садыков, Дж. М. Джахангиров

Азербайджанское Национальное Аэрокосмическое Агентство

Баку, Азербайджан, AZ 1 106, пр. Азадлыг, 159

E-mail: galib@mail.ru

Дистанционный мониторинг зон экологической напряженности на деградирующих территориях, нефтяных загрязнений морской акватории, маршрутов проектируемых трасс нефтегазопроводов, селеопасных и оползнеопасных зон, зон затопления и вулканической активности становится наиболее актуальной проблемой. Важным моментом использования новых спутниковых навигационных технологий в этом направлении представляется формализация выбора и распределения информативных зон и контрольных точек. В рамках решения проблемы районирования (демаркации) экологически напряженных зон рассматривается задача оценки информативных направлений при выборе трасс наблюдения экологических процессов.

Планирование рекогносцировочных дистанционных измерений включает также формализацию модельного представления контролируемых экологических процессов (распространения загрязнений, деградаций) нелинейными уравнениями диффузии. При этом выбор функции распределения источников напряженности корректируется последовательными итерационными процедурами в интерактивном режиме получения данных. Существенным моментом является использование пространственно-временной шкалы изменчивости контролируемых процессов с выделением характерных частотных диапазонов и критических точек изменения параметров экосистемы.

Отмечается важность самолетных съемок для сбора базовой подспутниковой информации с целью решения вышеотмеченных задач районирования зон экологической напряженности. На современном этапе интенсивного использования спутниковых навигационных технологий такой сбор базовой подспутниковой информации включает в качестве доминирующего звена GPS–позиционирование контролируемых информативных точек по маршруту. В результате мы имеем возможность прослеживать в интерактивном режиме по электронной Интернет-карте состояние (динамику) контролируемых точек в «активных зонах».

Разработка информационной шкалы контроля и оценки состояния экологически напряженных зон является краеугольной проблемой формализации планирования маршрутов и трасс навигационного контроля при экологическом мониторинге.

Введение

В современных аэрокосмических дистанционных исследованиях в Азербайджане основное внимание акцентируется на развитии оперативных систем мониторинга и методов прогноза развития процессов и ситуаций на территории Республики. С одной стороны – это самолетное мультиспектральное сканирование, которое служит мобильным легко управляемым в пространстве и времени источником получения информации. С другой стороны – это имитационное компьютерное моделирование контролируемых ситуаций и процессов, невозпроизводимых в натуральных условиях или недоступных для наблюдения их в полном объеме всей картины развития ситуаций. Важно отметить особую актуальность этого этапа при стратегическом планировании мониторинга в условиях ограничений на средства измерений и исходные данные (спутниковые, наземные, априорные).

В результате имитационных экспериментов возможно оценивание наиболее информативных участков для каждого последующего планируемого этапа самолетного сканирования с координатным позиционированием точек измерения. В этом поэтапном процессе первоначально анализируется космический снимок изучаемой территории, затем планируются оптимальные координаты и трассы для последующего самолетного сканирования. При этом необходимо преобразовывать текущую комплексную информацию для получения в визуально анализируемом виде с целью интерактивного принятия решения по выбору контролируемых параметров в ходе съемки для каждой исследуемой сцены.

В работе рассматриваются следующие вопросы для решения вышеотмеченных проблем: 1) экспресс-анализа видеоданных для визуализации их в виде RGB изображений; 2) оценки исходных распределений характерных спектрально-оптических контрастов спутниковых и аэро-изображений экологически деградирующих объектов побережья Каспия; 3) имитационного моделирования и вычисления наиболее информативных координат траекторий съемок самолетного мультиспектрального сканирования для оптимального GPS позиционирования.

Факторы радиационного искажения

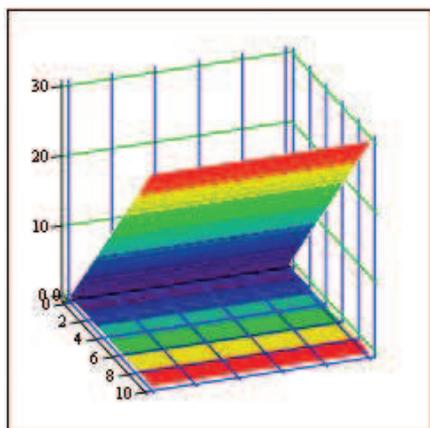
Реальные величины оптического сигнала, требующие нормировки, включают нелинейные составляющие спектрально-отражательных характеристик поверхности:

$$\frac{I(\lambda)}{\underline{\underline{S}}_{\lambda}^0 \zeta(\theta_0) \mu(\lambda)} = R \cdot (1 - \bar{A} \cdot c(\tau))^{-1} = R \cdot (1 + \bar{A} \cdot \bar{c}(\tau) + \bar{A}^2 c^2(\tau) + \dots),$$

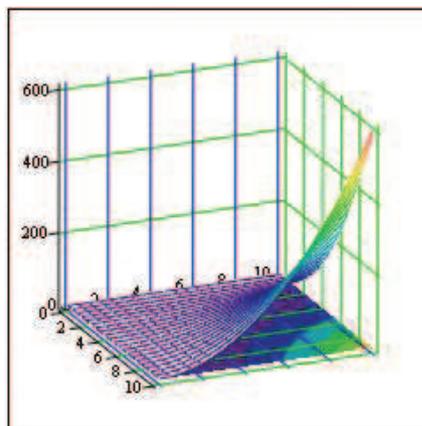
где $\underline{\underline{I}}(\lambda)$ - интенсивность регистрируемого сигнала, отражённого от поверхности, $\mu(\lambda, \tau)$ - функция пропускания атмосферы в зависимости от длины волны λ и оптической толщины атмосферы τ , от которой зависит также параметр $c(\tau)$ в правой части выражения; $\underline{\underline{S}}_{\lambda}^0$ - солнечная постоянная с индексом λ ; $\zeta(\theta_0)$ - косинус угла падения θ_0 солнечной радиации; \bar{A} - усредненное по горизонтальной координате альbedo поверхности, $R = R(\lambda, x)$ - спектрально-отражательная характеристика оптически неоднородной поверхности.

Выражение для нормирующего потока падающей радиации в знаменателе левой части последнего выражения зависит от потока солнечного излучения на верхней границе атмосферы, косинуса угла падения радиации, функции пропускания атмосферы. В правой части рассматриваемое нормировочное соотношение представлено произведением искомой спектрально-яркостной (отражательной) характеристики и геометрической прогрессии, учитывающей многократное переотражение солнечной радиации от поверхности.

Отсюда видно, что линейные комбинации для спектральных коэффициентов более корректны или вообще допустимы при малых значениях R и $c(\tau)$. Другие ограничения применимости индексов вызваны их «узкой специализацией» по идентифицируемым параметрам природных образований и их состояний, соответственно каждому набору каналов. Между тем, это не избавляет их от перекрестной чувствительности к другим параметрам состояния, ввиду нелинейной многофакторной зависимости спектрально-яркостных характеристик (от проективного покрытия, влажности, состава, структуры поверхности, геометрии съемки, параметров атмосферы и освещения). На рис.1 показаны моделируемые зависимости нормировочного отношения: от спектрально-отражательной характеристики R и от атмосферного параметра c . На рис.2 изображены поверхности чувствительности регистрируемых спектрально-яркостных характеристик к влажности V , геометрии съемки H (высоте), пространственной частоте $\underline{\underline{K}}$ неоднородности (рельефа, проективного покрытия).

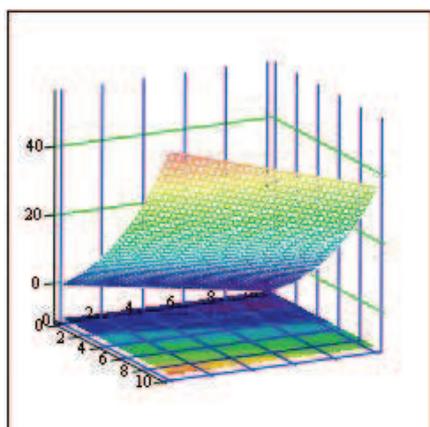


R,R

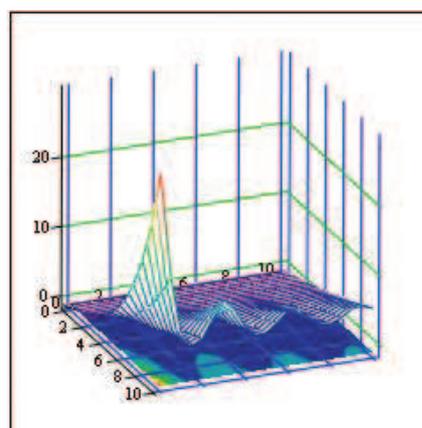


C,C

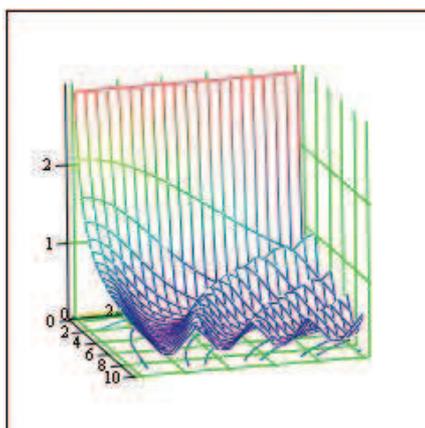
Рис. 1. Моделируемые зависимости нормировочного отношения: а)- от R в линейном приближении спектрально-отражательной характеристики поверхности (слева); б) - с учетом нелинейных членов зависимости от атмосферного параметра c (справа)



R1,R1



R2,R2



R3,R3

Рис. 2. Моделируемые поверхности отображают зависимости функций (слева направо):
 а) - $R1$ от длины волны (ось Y) и от влажности почвы (ось X);
 б)- $R2$ от длины волны (ось X) и от высоты съемки (ось Y);
 в)- $R3$ от высоты (ось Y) и от частоты пространственной неоднородности рельеф (ось X)

Методика имитационного эксперимента

В качестве тестового материала исследования служили характерные участки деградации северной прибрежной зоны Азербайджана с типичными природными и антропогенными процессами (обезлесивания, деградации растительности, морских загрязнений, береговой эрозии). В наших исследованиях использовались результаты предварительного анализа и обработки экспериментального материала по корреляции RGB характеристик дистанционно зондируемых природных объектов с параметрами состояния и свойствами этих объектов (содержание хлорофилла в растительности, состояние водоемов, почв, моря) на основе известных методов расчета колориметрических характеристик (параметров цвета, цветности и т. д.) известных классов объектов по многоспектральным данным. Сюда включались этапы радиационной и атмосферной коррекции первичного сканерного сигнала в каждом из каналов по результатам модельных расчетов спектрального хода соотношения рассеянной и суммарной солнечной падающей радиации с имитацией реальных параметров съемки (широта местности, угол солнцестояния, высота съемки, состояние облачности). Такая имитационная структура позволяет интерактивно проводить экспресс-оценку и контроль режимных характеристик съемки, задавая оптимальные режимы (коэффициентов усиления, динамических диапазонов для каждого спектрального канала и т.д.) в результате предварительного экспресс-анализа каждой распознаваемой сцены. Ниже демонстрируются снимки одного из каналов самолетно-сканерных изображений, содержащих информацию в 256-градационной шкале.

Снимки, полученные в 256 градациях, были затем преобразованы в цветные снимки согласно таблицам преобразования к стандартам RGB [1]. Для приведения в соответствие полученных цветных изображений известных классов объектов к их естественным цветам мы проводили следующие процедуры: а) нормировка сигнала сканера в каждом спектральном диапазоне на величину падающей солнечной радиации, учитывая известное время съемки и широту, а также спектральный ход солнечной постоянной и состояние облачности, в результате чего имеем относительную величину коэффициента отражения; б) приведение нормированных данных радиационной коррекции к данным на нулевом уровне съемки (условно называемом лабораторным, из которых исключено влияние атмосферы, т.е. спектральный и угловой ход характеристик падающей солнечной радиации); в) а также использование априорной информации о спектрах характерных классов объектов для визуализации интерактивного анализа путем перехода от спектральных к цветовым характеристикам для получения цветных изображений в системах RGB и XYZ, между которыми существует матрица перехода; г) оптимизация коэффициентов усиления каналов согласно таблице 1. Для реализации метода потребовалось разработать комплекс программных модулей, позволяющих обрабатывать изображения в каналах спектра от 400 до 800 нм, корректируя их по контрастности и яркости и меняя режимы усиления для каждого набора каналов в зависимости от сцены согласно решаемой задаче.

Таблица 1. Значения коэффициентов усиления для одного из спектральных каналов N нм в различных диапазонах изменений сигнала (согласно значению отношения T)

<i>T-отношение сигналов канала</i>	<i>K- коэффициент усиления</i>				<i>Характерный спектральный класс</i>
	$N=2$	3	6	7	
800нм к каналу N:					
$T>2$	1	0,8	1,5	1	Почва-растительность
$T<1$	3	2	4	3,5	море
$2>T>1$	0,5	0,8	1	1	почва

Из таблицы видны характерные режимы усиления спектральных каналов, позволяющие провести корректировку динамических диапазоны сканерной системы и проводить в последующем уверенную обработку на уровне распознавания основных классов объектов. В частности, при решении морских задач

планируется перенормировка коэффициентов усиления в сторону увеличения в коротковолновой области с соответствующим ослаблением в красной и ближней ИК.

Таблица 2. Данные спектральных каналов самолетного оптико-механического многоспектрального сканера «Апишерон»

Номер канала	Длина волны (нм)	Эффективная ширина полосы пропускания (нм)	Цветовые параметры
1	650	10	Красный
2	525	10	Зеленый
3	547	10	Желтый
4	850	80	БлижнийИК
5	1000	100	БлижнийИК
6	474	10	Синий
7	452	10	Синий
8	400-850	450	Интегральный

Обработка проводится для разных уровней регистрируемой солнечной радиации (в зависимости от условий съемки) при использовании алгоритмов перехода между натурными и лабораторными данными. Модули работы программы выполняют вышеперечисленные процедуры и могут быть отображены с целью наглядной демонстрации в цветовых изображениях RGB и XYZ систем, между которыми существует матрица перехода [1]. В работах [2, 3] используется трехканальная цветовая обработка изображений, включающих основные классы объектов, с целью их выделения и кластеризации на изображениях на основе априорной информации о характерных спектральных закономерностях этих классов, а также на основе использования цветовых индексов (комбинаций каналов), позволяющих оценивать состояние объектов и определять их принадлежность к тому или иному классу. В [2] используется комбинация известных цветовых коэффициентов NDVI и TCR с целью исключения влияния атмосферного искажения, однако вряд ли простым вычетом (сложением) значений этих коэффициентов можно скомпенсировать вклад влияния рассеянной радиации, входящей в регистрируемый сигнал нелинейно и отличающейся по значению в разных спектральных областях [4, 5, 6]. Такой подход применим при высоких углах солнцестояния и в длинноволновой области спектра, где ее вклад невелик, и погрешность такого линейного преобразования может быть приемлемой. В остальных случаях, учитывая нелинейный характер спектрального углового хода соотношения рассеянной и суммарной падающей солнечной радиации более точные результаты дадут очевидно используемый нами метод коррекции. На рисунке 3 демонстрируются результаты коррекции снимков характерных участков деградации.

Таким образом, разработанное программное обеспечение включает помимо модулей коррекции, предварительной нормировки сигнала и перехода к цветовому представлению (с вычислением цветовых коэффициентов), а также модули выбора оптимальных режимов коэффициентов усиления каждого спектрального канала сканера. Программа как бы адаптирует чувствительности каналов для каждой сцены по соответствию естественным цветам изображения объектов задаваемых спектральных классов. Разработанные программы интерактивной имитации позволяют помимо тематической интерпретации строить оптимальные стратегии сканирования и координатного позиционирования информативных участков [7]. В таблице 3 показаны результаты вычисления и поиска информативных участков для последующих сканерных съемок. Информативность является основным критерием для планирования оптимальной стратегии координатного (трассового) позиционирования сканируемых участков в деградирующей прибрежной зоне. Вычисляя режимы взаимодействия каждой пары сегментов для всех этапов процесса деградации мы определяем максимально информативные переходы по приростам информации между парами сегментов на каждом этапе и соответствующие им (сегментам) координаты и

направления распространения процесса деградации, где необходимо проводить сканирование на каждом последующем шаге развития процесса [7-8].

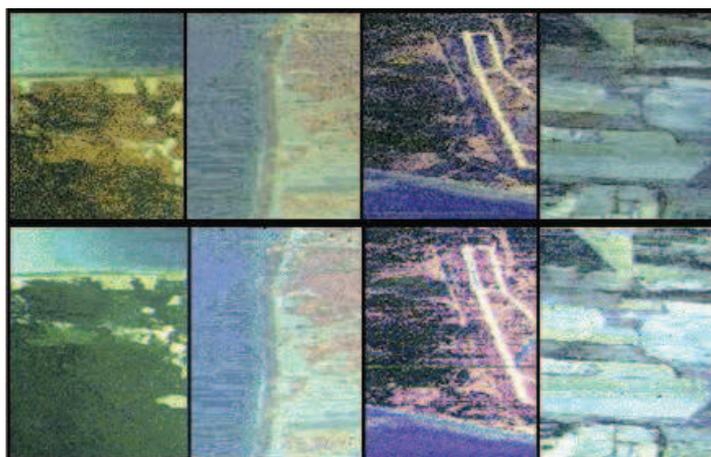


Рис 3. Многозональные самолетные сканерные аэроснимки без учета (верхний ряд) и с учетом (нижний ряд) нелинейной поправки вклада многократного переотражения. Для наглядности, обработанные в естественных RGB цветах многозональные аэроизображения, полученные в BMP формате, представляют почвенно-растительные и водные объекты (слева направо: лес с вырубками, морское побережье, взлетная полоса у моря, культивированные участки почвы)

Таблица 3. Оптимально информативные JK-пары комбинаций из всех 12 сегментов на спутниковом изображении Ландсат-ТМ, планируемые для 5-ти шаговой (5 этапной) процедуры самолетного сканирования, соответственно этапам развития экопроцесса

<i>Шаг</i>	<i>Сегмент J</i>	<i>Сегмент K</i>	<i>Прирост информации</i>
1	2	4	18,41
2	4	7	17,41
3	4	12	17,35
4	4	6	17,15
5	4	11	17,12

На рисунке 4 демонстрируется поисковая стратегия самолетного сканирования и 5-этапного координатного позиционирования наиболее информативных участков деградации. Снимок Landsat-ТМ исследуемой прибрежной зоны разбивается на 12 (или более) сегментов участков, подверженных разной степени деградации. На каждом сегменте вычисляется пространственное распределение оптических контрастов и радиационного балланса, по амплитуде которого определяется интенсивность нарушения а по частотам – направление распространения деградации. Там, где нулевая частота является доминирующей, независимо от интенсивности нарушения, выбираются базовые координаты сканирования от которых идет отсчет (этап 1). Все последующие координаты (направления) определяются по направлению максимальной изменчивости между парами сегментов более высокочастотных составляющих радиационного балланса, вносящих максимальный вклад в приращение информации [8].

Метрологические аспекты сопоставления, обмена и распространения аэрокосмической информации

Одной из актуальных проблем эффективного использования новых информационных и аэрокосмических технологий является практическая несогласованность источников информации и отсутствие единого метрологического обеспечения по результатам мониторинга состояния окружающей среды и природных ресурсов.

Несмотря на функционирование многочисленных экологических служб, институтов и организаций, в настоящее время назрела потребность в межрегиональной структуре, исполняющей в едином ключе функции систематических исследований по метрологии и моделированию мониторинговой информации о природных и антропогенных процессах. С другой стороны, необходима концепция единой экспертизы ситуаций в напряженных зонах и на проектируемых (осваиваемых) территориях. В основе такой концепции должна быть заложена систематизация комплексных моделей, экспертных оценок для выработки шкалы и критериев метрологической сопоставимости и адекватности материала с учетом использования новых аэрокосмических, информационных технологий и структур представления в форматах ИНТЕРНЕТ. Особую актуальность приобретает этот факт при реализации международных исследовательских проектов, проведении экспертиз, разработке международных законодательных актов межрегионального значения и аналогичных мероприятий (например, экологического или природно-ресурсного характера, прогнозирования природных катастроф), требующих оперативного обмена информацией и приведения потоков информации к сопоставимому и системно-регулируемому виду. Важным моментом в этой связи является моделирование спектрально – оптических и радиометрических показателей излучения неустойчивостей динамических экосистем и влияния их близости к критическим состояниям. Таким образом, главное внимание среди перспективных исследований уделяется моделированию прогноза и распознавания экстремально-динамических природных процессов: оползней, селей, половодий, вулканической активности, землетрясений с оценкой информативности их критических состояний.

Система должна функционировать в режиме целенаправленного поиска характерных участков с заданным распределением координат сканирования исследуемой критической области развития экосистемы или природного (антропогенного) процесса. В результате мы должны получить некоторую адекватную систему «информационной калибровки» сопоставляемого аэрокосмического материала и данных мониторинга из различных источников. По результатам моделирования оптической и спектральной деформации полей излучения в информативных областях перехода состояния экосистем и развития процессов мы будем также иметь возможность не только сопоставления разнопланового материала из разных источников, но и выделения наиболее информативных участков поиска, прогнозируемых по основным направлениям распространения процесса. В результате мы должны располагать единой экспертно-метрологической системой обмена аэрокосмической информацией межрегионального уровня на основе создания базы обобщенных моделей информативности дистанционных данных, что также расширяет, очевидно, перспективу рационального применения глобальных систем спутниковой навигации GNSS и проектирования иерархической унифицированной системы интерфейса.

Применительно к анализу полей излучения природных сред и обновлению выбора информационных метрик, используемых при интерпретации данных аэрокосмической съемки природной среды, актуальна проблема их адекватности и репрезентативности при использовании результатов спектрального зондирования системы “атмосфера-подстилающая поверхность”. Решение этой проблемы помимо фундаментального значения для развития концептуального аппарата аэрокосмической информативности имеет следующие прикладные направления мониторинга и прогноза процессов и ситуаций.

- Контроль динамики характерных природных и антропогенных процессов (экстремально-короткопериодических: селей, оползней, землетрясений,- и долгопериодических: опустынивания, обезлесивания, изменения климата, колебания уровня моря, засоления, эрозии почв).

- Контроль ресурсопользования и энергопотребления, строительства, земле-устройства.
- Контроль антропогенных изменений окружающей среды.
- Контроль транспортных коммуникационных сетей и потоков.
- Контроль нефтегазопроводных магистралей.

Традиционным направлением продолжает оставаться также дистанционное зондирование природных ресурсов (ДЗПР) в задачах нефтегазовой и рудной разведки.

В задачах тематической интерпретации спектрозональных изображений природных объектов принято использовать информационные метрики, основанные на информационной мере Шеннона, функционально зависящей от функций распределения вероятности спектрально – отражательных характеристик элементов природных образований и экосистем. Метрики модифицируются для каждого класса задач ДЗПР. Информационный критерий Шеннона в задачах распознавания спектральных классов объектов

$$I = 1/2 \ln \frac{\det K(r_{\lambda}^i, r_{\lambda}^j)}{\prod_i \sigma_{r_{\lambda}^i}^2}$$

использует ковариационную матрицу, аналогичную известной матрице рассеяния из теории переноса излучения. В знаменателе – произведение среднеквадратичных отклонений, в числителе – детерминант ковариационной матрицы. Поиск оптимальных значений в пространстве длин волн λ , в которых измеряется (попиксельно) величина спектрально-отражательной (яркостной) характеристики r_{λ} , осуществляется согласно условию

$$\lambda'_i = \arg \min_{\lambda} \ln \det [K (r_{\lambda}^i, r_{\lambda}^j)]$$

Используются также критерии D -оптимальности $F[D] = \ln \det M(p)$, по которым оптимизируются планы (стратегии) $P_i = P(X_i)$ измерений дистанционно зондируемой характеристики в каждой выбранной согласно плану

$$\arg \max_{p(\xi^*)} \det M(p, \xi) = \arg \min_{p(\xi^*)} \det D(p, \xi)$$

точке X_i координат варьируемого пространства независимых переменных. Оптимизация детерминанта матрицы Фишера фактически ищет план, минимизирующий детерминант дисперсионной матрицы D оценок параметров G модели спектрально-отражательной (яркостной) характеристики $R = R(X, G)$.

Как, известно матрица Фишера или обратная ей дисперсионная матрица параметров модели строятся на базисе коэффициентов (векторов) линейного разложения по параметрам модели:

$$R(X_k) = \sum f_i(X_k) * G_i$$

Оцениваемыми параметрами могут служить параметры проективного покрытия или засоленности. Однако линеаризацию по параметрам в этом случае можно провести в узком диапазоне их значений (например, при малых или слишком больших значениях проективного покрытия). Очевидно, решение многих задач ДЗПР в частности задач аэрокосмического мониторинга природных процессов должны включать структуры оптимальных планов экстраполяции использующие Q - критерии. Однако, если в области оптимизации сети мониторинга морских процессов механизм расчета достаточно развит ввиду существования известных уравнений для гидрофизических полей, то для суши такие расчеты носят эпизодический и часто полуэмвристический характер. Для некоторых экологических процессов деградации почвенно-растительных образований, механизмы изменчивости контролируемых параметров носят систематический характер. Чувствительными характеристиками деградации здесь обычно являются

параметры радиационного баланса и связанные с ними параметры пространственных контрастов яркости. Согласно общему подходу подобный процесс подчиняется нелинейному уравнению диффузии

$$\frac{dV}{dt} = \sum_{i,j} \frac{\partial^2 V(X, p, t)}{\partial X_i \partial X_j} + F(V, X_{ko}, t).$$

Распространение возмущения V имеет несколько характерных масштабов, т.е. характеризуется специфичным набором пространственных частот, определяющих наиболее информативные области протекания процесса. При экспоненциальных типах источников $F(V, X, t)$ искомое автомодельное решение можно выразить, пользуясь представлением $V = V[(1 - f(P))/Q(K - K_i)]$ через функцию распределения проективного покрытия $f = A * \exp[-P(m)]$, являющуюся также функцией m -биомассы деградирующей растительности, а также через коэффициент $Q(K - K_i)$, учитывающий влияние пространственных частот K изменчивости радиационного баланса. На характерных частотах K_i происходит изменение механизма деградации.

Следовательно, используемые критерии информативности должны модифицироваться при синтезе с учетом характера дистанционно контролируемого процесса механизмом включения как минимум двух составляющих: а) критерия информативности параметров радиобалансной (контрастно-яркостной) модели для оценки деградации по данным аэрокосмического спектрометрирования; б) критерия информативности модели направлений развития процесса. Таким образом, в расчетах информативности спектрального зондирования экосистем в задачах аэрокосмического мониторинга учет механизма перераспределения информативных областей, пространственных частот и других параметров необходим в качестве основы включения синтезированных многоцелевых критериев информативности. С другой стороны – на разных уровнях иерархии критические переходы обуславливают изменения экосистемы, вовлекающие новые процессы (например, климатические изменения). Здесь требуется искусство включения в синтезируемую структуру новых компонент информативности для оценки отображения глобальных изменений.

Однако для получения замкнутого цикла результатов «обработки-планирования-съемки» необходимо пройти несколько этапов, начиная с выделения зон максимальных амплитуд и масштабов характерных контрастов деградации, а также направлений наиболее интенсивного распространения высокочастотных компонент. Очевидно распределение координат базовых участков съемки устойчивой деградации и мобильно меняющихся направлений поиска новых наиболее информативных участков зависит от типа деградации и стадии ее развития. Однако оценка информативности должна быть адекватной относительно изменений условий съемки и сопоставимой на разных иерархических уровнях. Иными словами необходима информационная мера, естественным образом связанная с физическими характеристиками моделируемого поля излучения земной поверхности и инвариантная к изменениям условий съемки. Для этих целей мы предлагаем концепцию информационных функционалов калибровки ИФК

$$K_V = \frac{D^{1/2} [r_\lambda]_X}{\langle r_\lambda \rangle_X} = \frac{D^{1/2} [\bar{\rho}_{R,\lambda}^m]_X}{\langle \bar{\rho}_{R,\lambda}^m \rangle_X - \rho_{atm,\lambda}^m} \neq \mu_\lambda(\tau_0, \xi, \tau) \quad (1)$$

полученных вычислением средних $\langle \bar{\rho}_{R,\lambda}^m \rangle_X \dots \langle r_\lambda^m \rangle_X$ и дисперсий $D^{1/2} [\bar{\rho}_{R,\lambda}^m]_X \dots D^{1/2} [r_\lambda^m]_X$ оптически неоднородной поверхности по координатам X поверхности в результате статистической обработки величины коэффициента отражения $\bar{\rho}_{X,\lambda}^m$ поля излучения земной поверхности на уровне $(\tau - \tau_0)$ оптической толщины. Здесь $\rho_{atm,\lambda}^m$ - коэффициент отражения атмосферы, r_λ^m - коэффициент отражения поверхности по наземным измерениям, который в силу предположения независимости спектрального и углового хода (азимутального η и зенитного ξ) представляется выражением

$$r_{\lambda}^m(\eta, \xi) = L(\lambda) * R^m(\eta, \xi) \quad (2)$$

Находим инвариантные соотношения для коэффициента вариации, вычислив его из соотношения (8.1) с учетом (8.2). Очевидно, что здесь K_r не зависит ни от $\mu_{\lambda}(\tau_0, \xi, \tau)$ в силу свойств инвариантности (1) ни от $L(\lambda)$ в силу свойства (8.2).

Предлагаемое расширение обеспечивает адекватность и сопоставимость разноплановой аэро съемочной информации о природных процессах и, в частности, о деградирующих экосистемах совместно со всем циклом дистанционного зондирования природной среды из космоса. В результате мы получаем возможность для адекватности аэрокосмического мониторинга формировать многоцелевые и многофункциональные структуры представления запрашиваемой информации в ИНТЕРНЕТе с ее оптимальным обменом на разных иерархических уровнях в сопоставимом виде.

Основные результаты работы

1. Приведение сканерных изображений к форматам в системах RGB и XYZ позволяет не только проводить в интерактивном режиме экспресс-анализ сцен, но также и выбирать оптимальные режимы (коэффициенты усиления спектральных каналов чувствительности) съемки, используя качественные оценки соответствия получаемых снимков естественным колориметрическим характеристикам типичных спектральных классов деградации и критических состояний

2. Имитационное моделирование на базе использования критерия информативности и априорных данных о характерных распределениях спектрально-оптических контрастов деградирующих участков прибрежной зоны позволяет рассчитывать стратегию оптимального координатного (трассового) позиционирования самолетной сканерной съемки для каждого последующего этапа процесса деградации экосистемы в зонах экологической напряженности.

3. Процесс деградации и соответствующая имитационная процедура поиска в общем виде описывается нелинейным уравнением диффузии, решением которого является функция распределения радиационного баланса и/или оптических контрастов исследуемой территории. В случае сканирования больших территорий и для контроля сложных экосистем, разнопериодичных, экстремально-динамических природных процессов и других иерархических и экстремально-динамических структур (инфраструктур) использование этой стратегии наиболее актуально. Перспективны возможности использования параметрических моделей трансформации спектрально-яркостных отражательных характеристик при моделировании адекватных информационных характеристик экологических процессов для прогноза информативных направлений поиска их развития. Характерной особенностью для этих целей служит пространственная изменчивость, учитываемая в моделях спектрально-яркостных характеристик, которая иллюстрирует «осциллирующее» (но не гладкое) затухание высотного хода контрастов. Эта составляющая важна в расчетах информативности спектрального зондирования экосистем при учете механизма перераспределения пространственных частот и других параметров, особенно - информативных областей в области критического состояния развития процесса (деградации). Иными словами, отмеченная составляющая, как и полученные в результате исследования соотношения, могут служить в качестве основы критериев поиска информативных трасс и участков дистанционной съемки деградирующих экосистем (например, для контроля точек перегиба спектральных и пространственных контрастов участков с критическим состоянием параметров рельефа, влажности, физико-химических минералогических характеристик и т.п.)

Литература

1. Максимов В.В. Трансформация цвета при изменении освещения // М.: Наука, 1984.
2. Еременко В.В., Мошков А.В., Семенов А.А., Чимитдоржиев Т.Н. Метод выявления угнетенной растительности по данным спектрально-яркостного сканера // Исследование Земли из космоса, 1997. №6. С. 3-9.

3. *Nguyen Dinh Duong*. Semi-automated classification of land covers using satellite data // Proceedings of the Eighth Regional Seminar on Earth Observation for Tropical Ecosystem Management. Yangon, Myanmar, 25-29 October 1999. P. 101-109.
4. *Кондратьев К.Я., Козодеров В.В., Федченко П.П.* // Аэрокосмические исследования почв и растительности. Л.: Гидрометеиздат, 1986.
5. Многозональные аэрокосмические съемки Земли // Сб статей. Под редакцией академика Р.З. Сагдеева. М.: Наука, 1981.
6. *Савиных В.П., Смоктий О.И., Гусейнов Г.А.* Информативность и оптимальное планирование оптического аэрокосмического мониторинга Земли // МИИГАиК. М., 1990. 19 с. ДЕП. ОНИПР ЦНИИГАиК, 22.02.90, №:418-гд90
7. *Смоктий О.И., Гусейнов Г.А.* Информационные инварианты и калибровка спектрального зондирования природной среды из космоса // Труды VIII СПб. Междун. Конференции «РИ-2002». С.387-394
8. *Гусейнов Г.А., Егоров В.В., Садыков Р.Х.* Метрики информационной калибровки при трансформации оптических образов экосистем // Исследование Земли из космоса, 2006. №2. С.1-14