

ИНФОРМАЦИОННЫЕ СВОЙСТВА СПЕКТРАЛЬНЫХ КОЭФФИЦИЕНТОВ ЯРКОСТИ И ВЕГЕТАЦИОННЫХ ИНДЕКСОВ ДЛЯ КАЛИБРОВКИ АЭРОКОСМИЧЕСКИХ СНИМКОВ

Г. А. Гусейнов, О. И. Смоктий

Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации РАН
199178, Санкт-Петербург, 14-я линия ВО, д. 39РАН
<soi@iias.spb.su>

УДК 528.8 : 519 + 536

Г. А. Гусейнов, О. И. Смоктий. **Информационные свойства спектральных коэффициентов яркости и вегетационных индексов для калибровки аэрокосмических снимков** // Труды СПИИРАН, Вып. 2, т. 2. — СПб.: Наука, 2005.

Аннотация. Проведены исследования ограничений, связанных с применимостью и ошибками нормирования спектральных характеристик, вегетационных индексов и коэффициентов яркости, используемых при тематической интерпретации дистанционной аэрокосмической информации и в задачах построения геоинформационных систем (ГИС). Показаны условия использования информационно-энтропийного синергетического подхода для моделирования информационных характеристик дистанционной индикации параметров развитого экологического процесса.— Библи. 5 назв.

UDC 528.8 : 519 + 536

G. A. Guseynov, O. I. Smokty. **Information properties of spectral brightness coefficients and vegetation indexes for the aerospace images calibration** // SPIIRAS Proceedings. Issue 2, vol. 2. — SPb.: Nauka, 2005.

Abstract. Investigation use limitation and error of normalized information properties of the colors response curves, indexes and coefficients used at thematic interpretation of the space remote information as well as in GIS problems analysis are carried out. Use conditions of synergic approach of G. Haken's informational entropy are rotined for development and simulation of information remote indication performances of an ecological process characteristics with forecast possibility of its critical state and informative trends of spreading. — Bibl. 5 items.

Ограниченность использования спектрально-яркостных коэффициентов и вегетационных индексов

Использование в задачах тематической интерпретации космических спектрональных изображений природных объектов таких характеристик, как спектральные коэффициенты яркости $R(\lambda)$ и вегетационные индексы $I(\lambda)$, основано на традиционном предположении инвариантности комбинаций:

$$I(\lambda_j, \lambda_k) = \frac{R(\lambda_j) - R(\lambda_k)}{R(\lambda_j) + R(\lambda_k)}, \quad (1)$$

являющихся по сути отношениями энергетической нормировки на поток падающей радиации для получения характеристик, инвариантных относительно изменчивости энергетического потока. При этом неявно предполагается два допущения:

1. Пропорциональность регистрируемого сигнала $F(\lambda)$ в спектральном интервале $\Delta\lambda_{jk} = \lambda_j - \lambda_k$ потоку падающей радиации на верхней границе атмосферы $S(\lambda)$:

$$F(\lambda) = R(\lambda) \cdot S(\lambda) \quad (2)$$

2. Слабая изменчивость потока падающей радиации $S(\lambda)$ в интервале Δ_{ik} между каналами (i, k) .

Заметим, что принятые предположения для инвариантности индекса $I(\lambda_i, \lambda_k)$ не имеют достаточных оснований. Первое допущение реализуется в видимой области для почв с низкими отражательными характеристиками, и для растительности в узком интервале спектра (450–580 нм). Второе также весьма грубо ввиду существенной спектральной зависимости функции $S(\lambda)$ и также ограничено низкими значениями отражательных характеристик для почв. Между тем реальные величины оптических сигналов, измеряемых из космоса и требующих соответствующей нормировки, включают нелинейные составляющие для спектрально-отражательных характеристик подстилающей поверхности, обусловленные многократным переотражением солнечного излучения от нее [1]:

$$\frac{F(\lambda)}{S(\lambda) \cos \theta_0 \mu(\lambda, \theta_0)} \approx r [1 - Ac(\tau_0)]^{-1} = r [1 + Ac(\tau_0) + A^2 c^2(\tau_0) + \dots], \quad (2)$$

где $c(\tau_0)$ — сферическое альbedo атмосферы, A — альbedo подстилающей поверхности, μ — сумма прямой и диффузной прозрачности атмосферы при зенитном расстоянии Солнца θ_0 .

Выражение для потока падающей радиации $S(\lambda)$ определено в знаменателе формулы (2) и зависит от потока солнечного излучения на верхней границе атмосферы, косинуса угла падения излучения, функции пропускания атмосферы. В правой части рассматриваемое нормировочное соотношение представлено произведением искомой спектрально-яркостной характеристики на ее ряд, включающий параметр зависящий от функции оптической толщины атмосферы.

На рис. 1 а,б представлены сравнительные снимки и графики зависимостей нормировочного отношения: от $X = R$ и от $Y = c(\tau_0)$ без учета и с учетом этой поправки.

На рис. 1а представлены снимки без учета (верхний ряд) и с учетом (нижний ряд) этой поправки. Для наглядности, обработанные в естественных RGB цветах 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). На рис. 1б представлены сравнительные графики зависимостей нормировочного отношения: от $X=R$ и $Y=c$, — линейного по (R, C) и нелинейного, соответствующего второму члену ряда (2).

Другие ограничения применимости вегетационных индексов $I(\lambda_i, \lambda_k)$ вызваны их «узкой специализацией» по идентифицируемым параметрам природного образования и его состояний соответственно каждому набору спектральных каналов (λ_i, λ_k) . Между тем, это не избавляет их от перекрестной чувствительности к другим параметрам состояния, ввиду многофакторной зависимости спектрально-яркостных характеристик (от проективного покрытия, влажности, состава, структуры поверхности, геометрии съемки, параметров атмосферы и освещения).

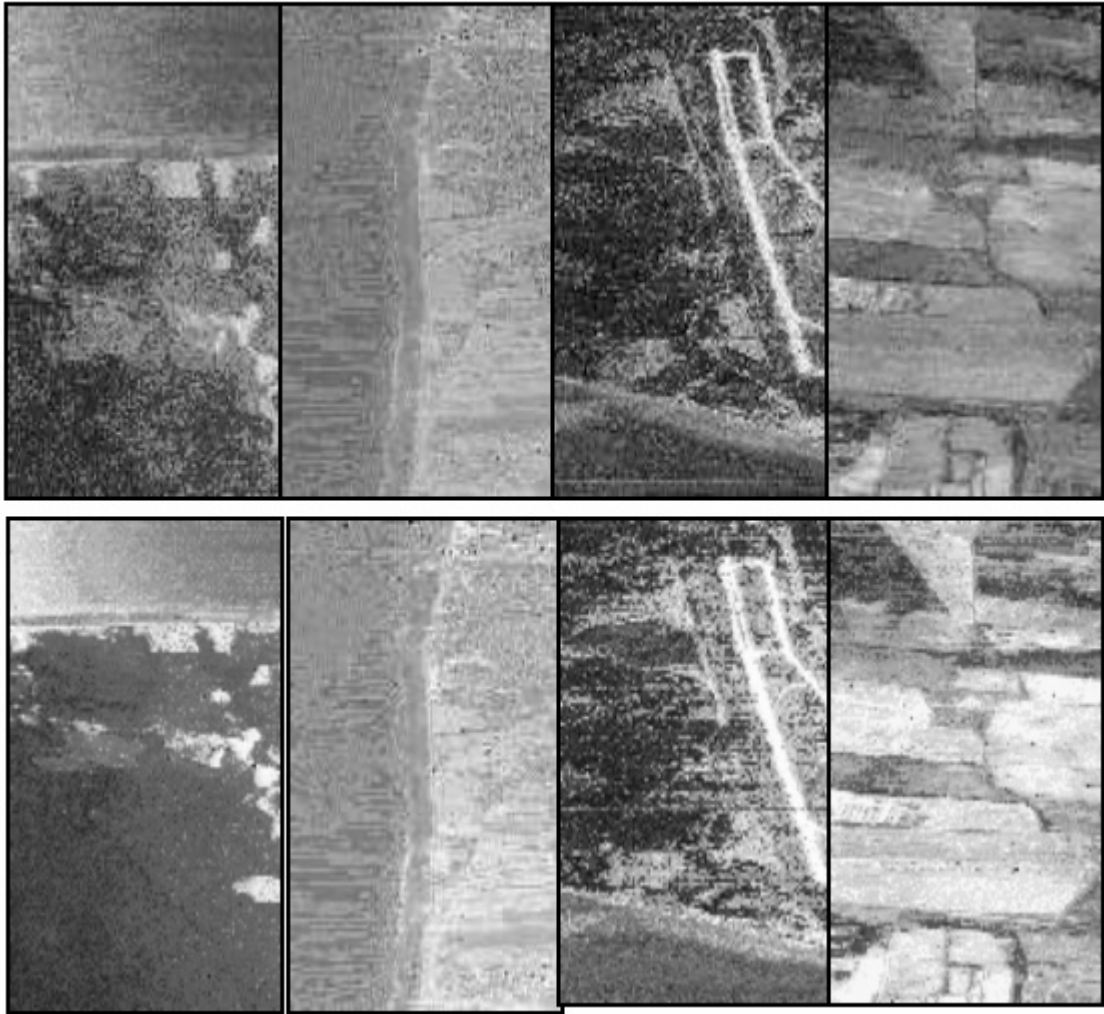


Рис. 1а. Сравнительные снимки и графики поправочных зависимостей нормировочного отношения(1).

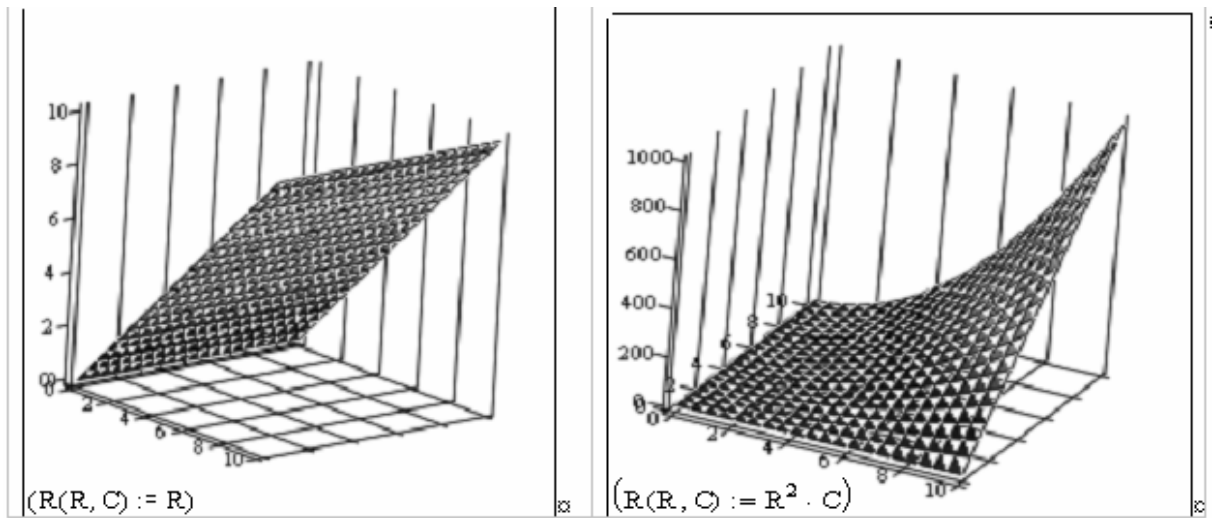


Рис. 1б. Сравнительные снимки и графики поправочных зависимостей нормировочного отношения(2).

На рис. 2 показаны моделируемые чувствительности регистрируемых спектрально-яркостных кривых к влажности v , геометрии съемки H , пространственной частоте неоднородности K (рельефа, проективного покрытия)

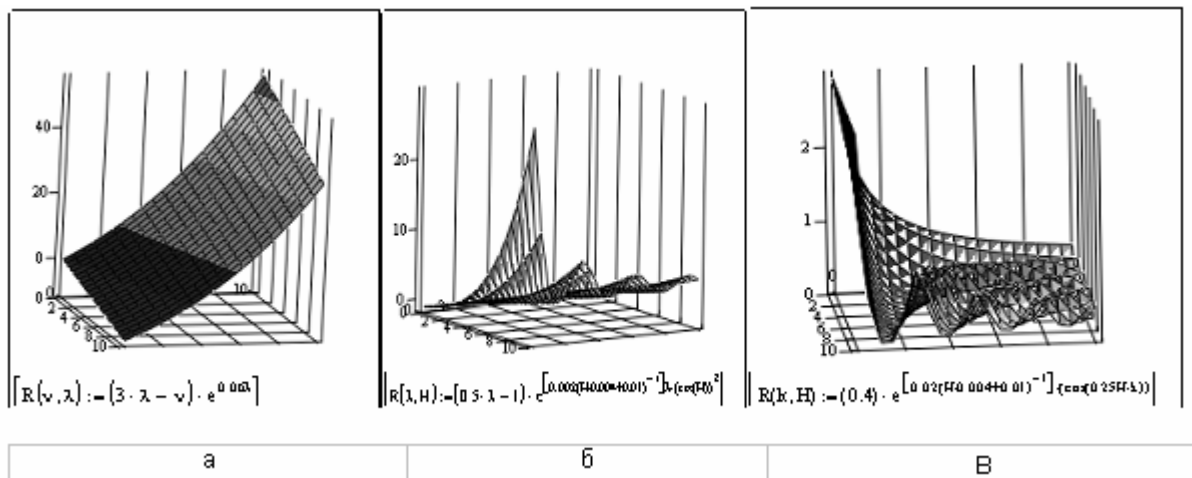


Рис. 2. Моделируемые чувствительности регистрируемых спектральных яркостей: а) спектральный ход (ось Y) от влажности почвы (ось X); б) спектральный ход (ось Y) от высоты съемки (ось Y); в) высотный ход (ось Y) от частоты пространственной неоднородности рельефа (ось X).

Представленные на рис. 2 поверхности моделировались на основе полученных в [1] нелинейных зависимостей в пространстве факторов съемки и идентифицируемых параметров природных образований. Ниже будут показаны преимущества используемых нелинейно-параметрических моделей (по сравнению со статическими наборами индексов для каждого идентифицируемого параметра) не только в многофакторности имитируемых связей дистанционных данных. Наиболее перспективны возможности их использования в качестве функции отклика при моделировании адекватных информационных характеристик экологических процессов для прогноза критических состояний и наиболее информативных направлений развития. Характерной особенностью для этих целей служит учитываемая в моделях пространственная изменчивость спектрально-яркостных характеристик, определяющая также иллюстрированный выше высотный ход. 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, она может 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.)

Основные положения при моделировании перераспределений оптических контрастов яркостей

В задачах дистанционного зондирования Земли часто имеют дело с многомерным вектором спектральной яркостной характеристики \vec{B}_λ , где $\lambda = \overline{1, n}$ — длина волны регистрируемого излучения.

Пространственно-временное распределение вектора $\vec{B}_\lambda(X, Y, t)$ определяет структуру радиационного образа. Данная величина является, вообще говоря, случайной, а в случае подчинения некоторой динамико-стохастической закономерности типа уравнения Ланжевена ее функция распределения удовлетворяет уравнению Фоккера-Планка

$$\frac{df}{dt} = -\frac{\partial}{\partial \vec{B}} [K(\vec{B}) \cdot f] + \frac{1}{2} Q \frac{\partial^2}{\partial \vec{B}^2} f. \quad (3)$$

Первый член (3) уравнения дрейфовый, второй - диффузионный. Стационарное решение определяется выражением

$$f_0 = N \cdot \exp \left[- \int_{B_0}^B \frac{2K(\vec{B})}{Q} d\vec{B} \right], \quad f(\vec{B}) \rightarrow 0, \quad \vec{B} \rightarrow 0. \quad (4)$$

Для многомерного вектора состояния $B_\lambda, (\lambda = 1, n)$ решение уравнения удается получить для частного случая, например, если Q_{jk} линейно по \vec{B}_λ а K_i не зависит от \vec{B}_λ .

Если рассмотреть функцию распределения вектора спектральной яркостной характеристики на разных высотах H при ограничении Марковскими процессами, то можно применить к условной вероятности принцип максимума информационной энтропии [2]

$$I = - \int f(\vec{B}_{it+\tau} / \vec{B}_i) \cdot \ln f(\vec{B}_{it+\tau} / \vec{B}_i) d\vec{B}, \quad F_1 = \langle \vec{B}_{it+\tau} \rangle, \quad F_2 = \langle \vec{B}_i(it+\tau) \cdot \vec{B}_k(it+\tau) \rangle. \quad (5)$$

Получаем

$$f[\vec{B}(t+\tau) / \vec{B}(t)] = \exp \left[\Lambda + \sum_i \Lambda_i \vec{B}_i(t+\tau) + \sum_{lk} \Lambda_{lk} \vec{B}_l(t+\tau) \cdot \vec{B}_k(t+\tau) \right], \quad (6)$$

где F_1, F_2 — первый и второй моменты функции условного распределения, соответственно; $\Lambda, \Lambda_i, \Lambda_{lk}$ — параметры Лагранжа, которые в общем случае могут зависеть от $\vec{B}(i)$.

По аналогии с неравновесными фазовыми переходами ищется экстремум показателя экспоненты выражения (6) согласно условию

$$\frac{\partial}{\partial B_l} \left[\Lambda + \sum_i \Lambda_i \vec{B}_i(t+\tau) + \sum_{lk} \Lambda_{lk} \vec{B}_l(t+\tau) \cdot \vec{B}_k(t+\tau) \right] = 0. \quad (7)$$

Этот экстремум соответствует стационарным решениям уравнения Фоккера-Планка (3) и в случае многомерного вектора. В результате получаем решение системы для двух спектральных каналов $\lambda_i (i = 1, 2)$

$$4\Lambda_1^2 B_1 + 4\Lambda_1 \Lambda_2 B_2 + \Lambda_1 = 0, \quad (8)$$

$$4\Lambda_1 \Lambda_2 B_1 + 4\Lambda_2^2 B_2 + \Lambda_2 = 0 \quad \begin{pmatrix} B_1 \\ B_2 \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{4} \cdot \frac{(1 + 4\Lambda_2 B_2^0)}{\Lambda_1} \\ B_2^0 \end{bmatrix}. \quad (9)$$

На рис. 3 показаны моделируемые поверхности потенциальной функции при поиске экстремальных распределений в пространстве вектора спектрально-

яркостной характеристики двух каналов λ_i ($i = 1,2$) для различных значений параметров Λ_i .

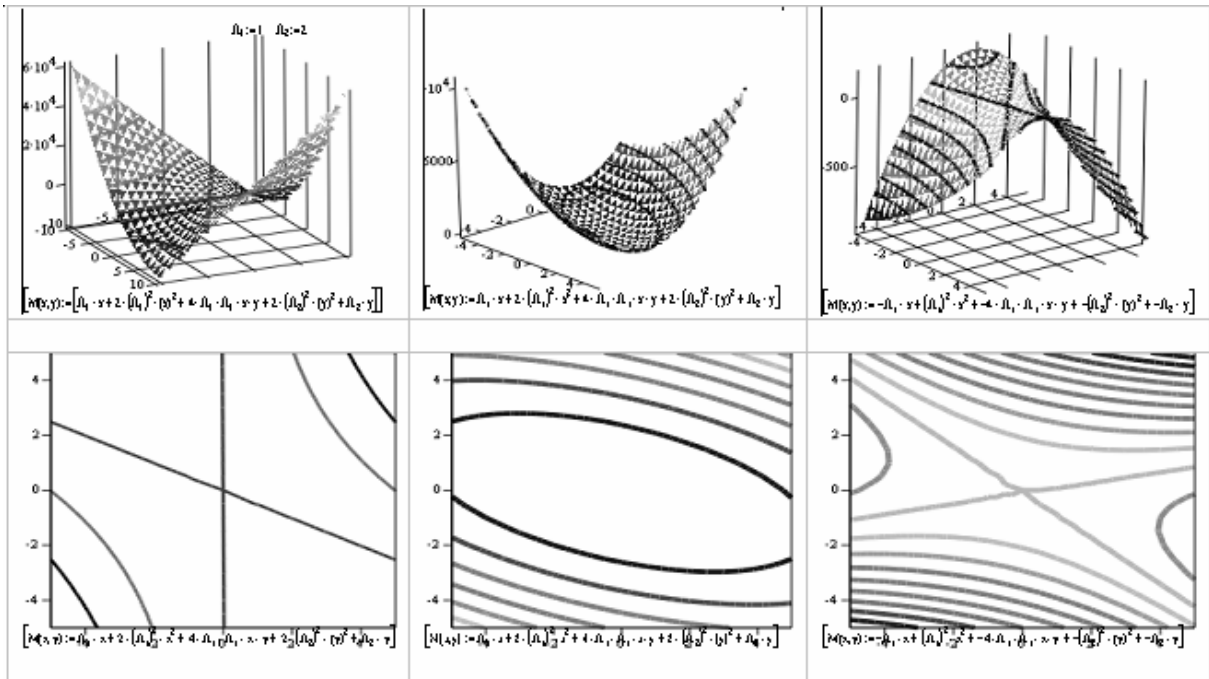


Рис. 3. Поверхности моделируемой потенциальной функции в пространстве вектора яркости (в данном случае в двух спектральных каналах λ_i ($i = 1,2$), оптимизируемой при различных критических значениях параметров Лагранжа Λ

На рис. 4 представлены поверхности высотной редукции моделируемой потенциальной функции показателя экспоненты, соответствующей стационарному решению уравнения Фоккера-Планка.

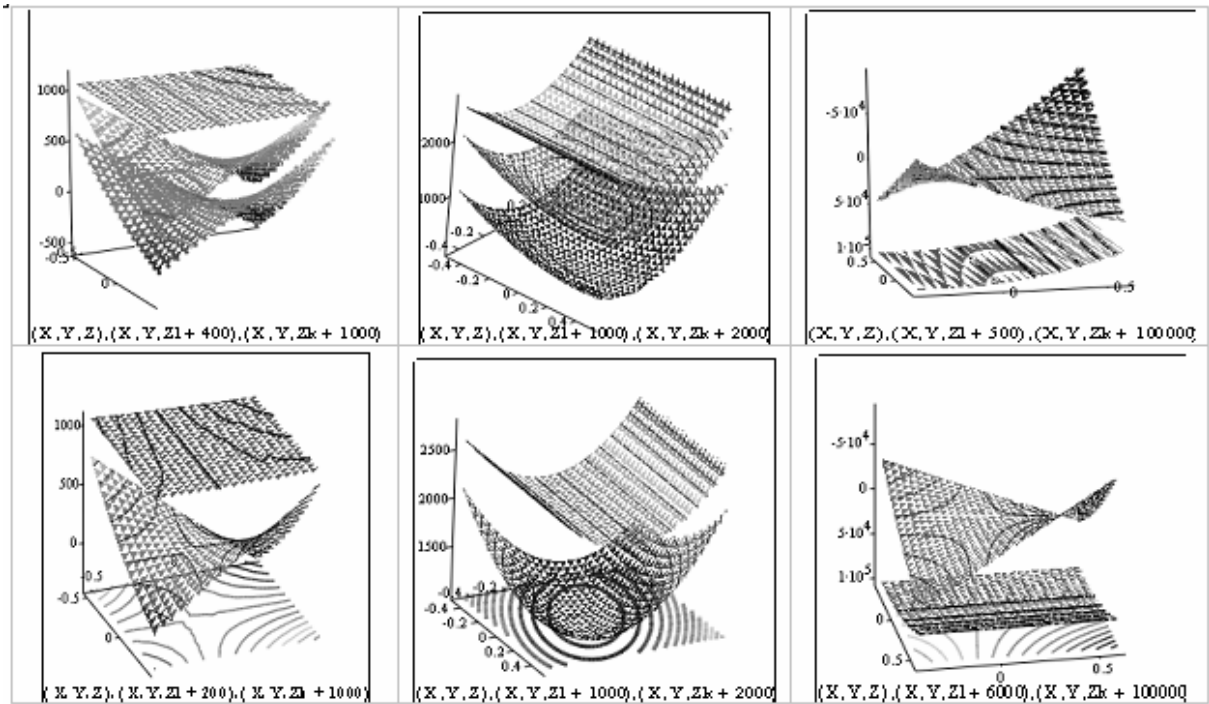


Рис. 4. Поверхности высотной редукции моделируемой потенциальной функции показателя экспоненты, соответствующей стационарному решению уравнения Фоккера-Планка

На рис. 4 представлены данные для критических значений параметра Лагранжа Λ , определяющего тип поверхности с характерными экстремумами, соответствующими, например, характерной частоте появления пиков пространственных контрастов яркостей природного образования. В приближении стационарного решения трансформация сглаживания спектров с высотой объясняется исчезновением отдельных пиков в результате расплывания (перераспределения) контрастов яркостей природного образования.

В основе моделирования может быть положено использование следующего представления [1]:

$$\langle R(\lambda) \rangle = R_0(\lambda) \cdot \exp[-\beta(\lambda) \cdot \langle \alpha(x) \rangle], \quad (10)$$

где $R_0(\lambda)$ и $\beta(\lambda)$ являются детерминированными функциями, зависящими от длины волны регистрируемого излучения и определяемые из лабораторных спектрофотометрических измерений. Функция $\alpha(\lambda)$ является случайной функцией пространственной изменчивости, моделирующей распределение наклонов отражающих микроплощадок, которые попадают в поле зрения спутникового прибора (элемента разрешения изображения).

Физический смысл и информационно-поисковые возможности пространственно-частотной трансформации распределения контрастов яркостей природных образований

Анализ полей пространственно-частотных контрастов яркостей спектрально-оптических характеристик деградирующих экосистем дает основание для их тесной взаимосвязи с частотно-временными характеристиками многомасштабных природных процессов. Основанием этого утверждения может служить тот факт, что в предположении об эргодичности природных процессов можно моделировать экосистему при широком спектре масштабов ее пространственной изменчивости на значительных временных промежутках [2]. Для наиболее полного моделирования экосистемы необходимо проследить спектр различных масштабов пространственной изменчивости из наиболее информативного диапазона. В работе [3] показан механизм процесса опустынивания, для идентификации различных стадий которого используются пространственные признаки распределения оптических контрастов и радиационного баланса, соответствующие информативным масштабам деградации. В работе [4] исследована физика воздействия пространственной изменчивости радиационного баланса в основе эффектов метеорологической неустойчивости в критической области: объясняется неустойчивость деградирующей экосистемы, переходящую в область необратимости, соответствующую критическим масштабам деградации.

Напомним, что свойства генерализованного изображения (в т.ч. спектральные), выявленные в результате многомасштабных измерений, являются взаимодополняющими, но не выражаются через некоторый уровень максимальной детализации [5]. В этом смысле наиболее емким содержанием располагает не столько непосредственно определяемая из вегетационных индексов информация, сколько пространственно-временные и частотные распределения параметров — индикаторов характерных стадий идентифицируемого экологического процесса. При этом выявляется разная роль низкочастотной и высокочастотной составляющих развития процесса деградации элементов и структур природной экосистемы.

Важным моментом в этой связи является моделирование спектрально-оптических и радиометрических показателей неустойчивостей динамических экосистем и влияния их близости к критическим состояниям. В результате мы должны получить некоторую адекватную систему «информационной калибровки» сопоставляемого аэрокосмического материала и данных мониторинга из различных источников. При полном учете компонентов моделирования оптической и спектральной деформации полей излучения в информативных областях критического перехода состояния экосистемы (развития процесса) появляется возможность не только для сопоставления материала из разных источников, но и для выделения наиболее информативных участков поиска, прогнозируемых по основным направлениям распространения процесса.

Литература

- [1] *Смоктый О. И., Гусейнов Г. А.* Информативность и оптимальные планы дистанционного спектрометрирования земной поверхности. СПб: СПИИРАН, Препринт № 57, 1992. 72 с.
- [2] *Haken H.* Information and Self-Organization. A Macroscopic Approach. Springer-Verlag, 1988.
- [3] *Виноградов Б. В.* Аэрокосмический мониторинг экосистем. Л.: Наука, 1991.
- [4] *Головко В. А., Козодеров В. В.* Радиационный баланс: Новые применения к изучению стихийных бедствий из космоса. Исследование Земли из Космоса. № 1, 2000. с. 26-41.
- [5] *Смоктый О. И., Гусейнов Г. А.* Принципы информационной калибровки (ИФК) информационные и инварианты. Труды VIII юбилейной международной конференции "Региональная информатика 2002 (РИ-2002)", СПб, 2003.