

ИНФОРМАТИВНОСТЬ СПЕКТРОВ ДЕГРАДАЦИИ ПРИРОДНЫХ ЭКОСИСТЕМ ПРИ ДИСТАНЦИОННОМ ЗОНДИРОВАНИИ ЗЕМЛИ ИЗ КОСМОСА

О. И. СМОКТИЙ, Г. А. ГУСЕЙНОВ

Санкт-Петербургский Институт Информатики и Автоматизации РАН

СПИИРАН, 14-ая линия В.О., д.39, Санкт-Петербург, 199178

<soi@iias.spb.ru>, <galib@mail.ru>

УДК 528.8, 519.6–551.521

Смоктий О. И., Гусейнов Г. А. Информативность спектров деградации природных экосистем при дистанционном зондировании Земли из космоса // Труды СПИИРАН. Вып. 5. — СПб.: Наука, 2007.

Аннотация. На основе спектральной аэрокосмической информации проводится сравнительный анализ яркостных и пространственно-контрастных характеристик деградирующих почвенно-растительных, лесных и водных экосистем. Рассматриваются их имитационные модели, включая модели динамики популяций (биомассы) и распространения загрязнений. Выделены характерные диапазоны параметров устойчивых состояний, определяемых идентифицируемыми характеристиками их спектральных оптических образов. Рассматриваются инварианты яркостей, соответствующие линейным преобразованиям полей излучения относительно условий съемки, для которых определяются функционалы информативности. На базе критериев информативности Шеннона и Фишера формулируется новое понятие спектра деградации экосистемы на основе выделения характерных динамических состояний, связанных с пространственной изменчивостью природной среды и переходами при критических значениях ее параметров между определенным набором образов, в виде фазовых портретов со специфической структурой. Предложен новый алгоритм формирования информационных функционалов калибровки для исследования динамики деградирующих природных экосистем. Отдельно рассмотрены информационные свойства атмосферного канала (фильтра), трансформирующего спектральные яркости и контрасты яркостей природной среды при аэрокосмической съемке Земли из космоса. — Библ. 29 назв.

UDC 528.8, 519.6–551.521

Smokty O. I., Huseynov G. A. Informational content of natural ecosystems degradation spectra for remote sensing of the Earth from space // SPIIRAS Proceedings. Issue 5. — SPb.: Nauka, 2007.

Abstract. The analysis of natural ecosystem brightness and contrast on the base of spectral aerospace information have been carried out. A spectral-time, angular and spectral verifying of this ecosystems is investigated. Some imitative models including dynamic models of biomass and of natural pollution propagation are considered also. State parameters specific intervals for the stable conditions connected with radiative images are separated. The notation of formational calibration invariants related to linear transformations of the environment radiation fields and spectra determination of degrading ecosystem are formulated. Informational calibration functionals for remote sensing data having been constructed on the base of Shannon's and Fisher's criteria are considered. New algorithm for the information calibration procedures is suggested. Informational properties of spectral atmospheric filter having been transforming environment radiation fields for remote sensing of the Earth from space are discussed separately. — Bibl. 29 items.

1. Введение

Одной из актуальных проблем эффективного использования новых аэрокосмических и информационных технологий при дистанционном зондировании природной среды из космоса является несопоставимость и практическая несогласованность данных, полученных из разных источников при отсутствии единого метрологического и информационного обеспечения результатов соответствующего мониторинга, включая количественные оценки параметров состоя-

ния окружающей среды [1]. Несмотря на функционирование многочисленных экологических служб, отраслевых институтов и природоохранных организаций в настоящее время остро ощущается необходимость в создании межрегиональной межведомственной структуры, отвечающей на единой комплексной основе за систематические исследования по метрологии (калибровке) и имитационному моделированию мониторинговой наземной и аэрокосмической информации о природных и антропогенных процессах в окружающей среде. С другой стороны, необходима концепция единой комплексной экспертизы ситуаций разного пространственно-временного масштаба в экологически угнетенных зонах и на проектируемых (осваиваемых) территориях. В основу такой концепции должна быть положена систематизация комплексных экологических моделей, территориальных природных и агропромышленных зон с соответствующими экспертными оценками для выработки оптимальных критериев и шкалы метрологической сопоставимости анализируемых данных [2]. При этом новые аэрокосмические и информационные технологии необходимо интегрировать в базы данных и экспертные системы, использующие сетевые структуры и представления в форматах ИНТЕРНЕТ. Особую актуальность приобретает этот факт при реализации международных исследовательских проектов, проведении межведомственных экологических экспертиз и оценок, разработке международных и национальных природоохранных мероприятий и законодательных актов, имеющих межрегиональное и трансграничное значение. Например, при построении региональных карт экологического или природно-ресурсного характера, а также при прогнозировании природных и техногенных катастроф, требующих оперативного использования и обмена информацией, включая приведение информационных потоков к сопоставимому и системно-регулируемому виду. Важное значение в этой связи приобретает моделирование информационных свойств природных экосистем на основе изучения спектральных оптических и радиометрических характеристик полей излучения в зонах их неустойчивой динамики и близости к критическим нестабильным состояниям [3–4].

Таким образом, в настоящее время в рамках указанных выше перспективных исследований основное внимание должно уделяться имитационному моделированию систем прогноза контроля и управления, а также построению на основе совмещенного комплексного, системного и информационного подходов оптимальных планов и оптимальных наборов наиболее информативных признаков для распознавания нестандартных техногенных ситуаций и экстремально-динамических природных процессов (оползней, селей, половодий, вулканической активности, землетрясений) с одновременной оценкой информативности зон их нестабильности и критических состояний [5]. При этом перспективная система должна функционировать в режиме целенаправленного поиска характерных участков земной поверхности с заданным распределением координат сканирования для исследуемой критической области развития природной экосистемы, антропогенного процесса или техногенного кризиса. В итоге работы такой системы должна сформироваться некоторая адекватная динамическая модель информационной калибровки аэрокосмических данных, получаемых из различных источников, и результатов соответствующего наземного мониторинга [6]. При таком подходе имитационное моделирование спектральной оптической и пространственно-частотной трансформации полей излучения в наиболее информативных областях перехода состояний экосистем и развития природных или техногенных процессов позволяет не только сопоставлять и анализировать разноплановые данные, но и выделять наиболее информатив-

ные участки для поиска прогнозируемого развития экологических процессов. Следовательно, создание единой геоинформационной системы с элементами калибровочной экспертной оценки данных при обмене и анализе наземной и аэрокосмической информации совместно с базой обобщенных моделей информативности, несомненно, расширяет перспективу более эффективного применения существующих глобальных систем исследования природных ресурсов Земли совместно с системами спутниковой навигации и дистанционного зондирования экосистем, включая проектирование иерархической унифицированной системы интерфейса между пользователями и центрами обработки аэрокосмической информации [7].

Применительно к анализу полей излучения природных сред и выбору единых информационных метрик, необходимых для полной и всеобъемлющей интерпретации данных аэрокосмической съемки природной среды, сегодня актуальна проблема исследования их информационного содержания (информативности), информационной калибровки, адекватности и репрезентативности по результатам многоспектрального дистанционного зондирования системы «атмосфера – подстилающая поверхность», включая построение оптимальных планов такого зондирования [6]. Решение этих задач помимо самостоятельного значения для геоинформатики и развития фундаментальной теории информативности природных динамических процессов важно также для развития следующих прикладных исследований в области аэрокосмической съемки Земли, прогноза, контроля и управления экологическими процессами и ситуациями в региональном и глобальном масштабах:

- контроль за динамикой характерных природных и антропогенных процессов как экстремально-короткопериодических (сели, оползни, землетрясения), так и экстремально-долгопериодических (опустынивание, обезлесование, изменения климата, колебания уровня моря, засоления и эрозия почв);
- контроль землеустройства, ресурсопользования и энергопотребления, городского и промышленного строительства;
- контроль антропогенных и техногенных изменений окружающей среды;
- контроль наземных и морских транспортных коммуникационных сетей и потоков;
- контроль нефтегазовых терминалов, магистралей и трубопроводов.

Заметим также, что традиционным направлением продолжает оставаться дистанционное зондирование природных ресурсов (ДЗПР) в задачах нефтегазовой разведки и поиска полезных ископаемых, включая прибрежные зоны и морские шельфы.

Очевидно, что построение калибровочной информационной модели для оценки параметров деградирующей (угнетенной) природной экосистемы следует проводить на основе исследования динамики ее спектральных яркостных и пространственно-контрастных характеристик. В этой связи, в рамках сформулированных выше задач, важное значение имеет проблема спектральной пространственно-частотной трансформации (фильтрации) оптической аэрокосмической информации при учете искажающего влияния атмосферы во время дистанционного зондирования Земли из космоса [8]. Информативность моделей атмосферной трансформации спектральных оптических характеристик экосистемы, выраженная в единицах бит/параметр, аналогична информативности спектральных оптических образов в задачах распознавания, выраженной в единицах бит/признак [9]. Иными словами, вычисляя информативность в рам-

ках этих разноплановых задач (параметризация моделей и распознавание образов), мы имеем возможность оценивать и сопоставлять с помощью единой информационной метрики данные ДЗ природных экосистем. С рассматриваемых позиций становится также актуальным проведение линейных преобразований к единой информационной метрике различных распределений спектральных яркостных и пространственно-контрастных характеристик почвенно-растительных, лесных и водных экосистем, трансформируемых аэрозольной земной атмосферой. Отсюда следует, что поиск эффективных алгоритмов оценки информационного содержания дистанционных данных при индикации количественных параметров состояния окружающей среды неразрывно связан, во-первых, с проблемой получения адекватной информационной метрики для интерпретации дистанционных данных, а во-вторых, с оптимальной параметризацией атмосферного оптического канала (фильтра). При этом выделение характерных диапазонов оптимальной информативности повышает общую оценку информативности спектров деградации экосистем при их дистанционном зондировании. Естественно, что знание атмосферной фильтрации спектральных, пространственно-угловых и частотных распределений оптических образов системы «объект – фон», а также соответствующая дискретизация дистанционных измерений повышают эффективность планирования аэрокосмической съемки и поиска наиболее информативных углов и координат для определения оптимального числа измерений и параметров имитационной модели плана [10].

2. Информационные функционалы калибровки

Остановимся теперь на формальном аппарате, используемом в задачах тематической интерпретации и оценках информативности спектрально-аэрокосмических изображений природных объектов. Как правило, при анализе информационного содержания (информативности) данных космической съемки Земли используются информационные метрики, основанные на информационной мере Шеннона, функционально зависящей от функции распределения вероятности спектрально-отражательных характеристик элементов природных образований и экосистем [11]. Метрики модифицируются для каждого класса задач ДЗПР. Информационный критерий Шеннона (информационная матрица) в задачах распознавания спектральных классов объектов для количества информации

$$J_{ij} = \frac{1}{2} \ln \frac{\det K(r_{\lambda,i}, r_{\lambda,j})}{\prod_i \sigma_i(r_{\lambda,i})} \quad (1)$$

использует ковариационную матрицу \mathbf{K} , аналогичную известной матрице рассеяния в классической теории переноса излучения [12]. В знаменателе формулы (1) указано произведение среднеквадратичных отклонений σ_i , в числителе — детерминант ковариационной матрицы \mathbf{K} . Поиск оптимальных значений для интервала длин волн λ_{ij} , в которых измеряется (попиксельно) величина спектрально-отражательной (яркостной) характеристики природной среды r_{λ} , осуществляется согласно общепринятому условию

$$\lambda_{ij} = \text{Arg min}_{\lambda} \ln \left\{ \det [K(r_{\lambda,i}, r_{\lambda,j})] \right\}. \quad (2)$$

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 при фиксированной длине волны λ в каждой i -ой точке варьируемого пространства независимых переменных $X_i(x, y, z, \eta, \xi, \varphi)$

$$\text{Arg} \left\{ \max_{p(\eta, \xi, \varphi)} [\det \mathbf{M}(p, \eta, \xi, \varphi)] \right\} = \text{Arg} \left\{ \min_{p(\eta, \xi, \varphi)} [\det \mathbf{D}(p, \eta, \xi, \varphi)] \right\}. \quad (3)$$

Угловые величины (η, ξ, φ) в (1) характеризуют соответственно направление визирования, зенитное расстояние Солнца и азимут визирования, а x, y, z — пространственные декартовы координаты. Оптимизация детерминанта матрицы Фишера \mathbf{M} фактически ищет план, минимизирующий детерминант дисперсионной матрицы \mathbf{D} оценок параметров \mathbf{G} модели R спектрально-отражательных характеристик природной среды

$$R = R(X, G). \quad (4)$$

Как известно матрица Фишера \mathbf{M} (или обратная ей дисперсионная матрица \mathbf{D} оценок параметров модели) строится на базисе коэффициентов (векторов) линейного разложения по параметрам модели:

$$R(X_k) = \sum_i f_i(X_k) G_i. \quad (5)$$

Оцениваемыми параметрами могут служить, например, характеристики проективного покрытия или засоленности почвы. Однако линейризацию по параметрам модели в этом случае можно провести в узком диапазоне их значений (в частности, при малых или слишком больших значениях проективного покрытия почвы). Очевидно, что решения многих задач аэрокосмического мониторинга природных процессов должны включать структуры оптимальных планов экстраполяции, использующие Q -критерии [13]. Однако если в области оптимизации сетей мониторинга морских процессов механизм расчета достаточно развит (ввиду существования известных уравнений для гидрофизических полей), то для суши такие расчеты носят эпизодический и часто полуэвристический характер.

Для некоторых экологических процессов деградации почвенно-растительных образований, механизмы изменчивости контролируемых параметров носят систематический характер. Обычно чувствительными характеристиками деградации здесь являются составляющие радиационного баланса и связанные с ними параметры пространственных спектральных контрастов яркости [14]. Согласно общему подходу подобный процесс подчиняется следующему нелинейному уравнению диффузии [15]:

$$\frac{dV}{dt} = \sum_{i,j} \frac{\partial^2 V(X_{i,j}, v, t)}{\partial X_i \partial X_j} + F(V, X_{i,j}, v, t). \quad (6)$$

Распространение возмущения V имеет несколько характерных масштабов, т.е. характеризуется специфичным набором пространственных частот v , определяющих наиболее информативные области протекания динамического процесса. При экспоненциальных типах источников $F(V, X_{i,j}, v, t)$ искомое автомодельное решение V можно выразить, пользуясь представлением $V = V \{ [1 - f(P)] / Q(v - v_j) \}$ через функцию распределения проективного покрытия почвы $f = \exp A[-P(m)]$, являющуюся также функцией биомассы m дегради-

рующего растительного покрова $P(m)$, а также через коэффициент $Q(v - v_j)$, учитывающий влияние пространственных частот v на изменчивость радиационного баланса. На характерных частотах v_j происходит изменение механизма деградации, что определяет спектр деградации дискретного множества динамических состояний, отличающихся параметрами спектрально-пространственно-временного распределения и трансформации оптических характеристик природных экосистем.

Таким образом, с учетом характера дистанционно контролируемого процесса деградации используемые критерии информативности должны модифицироваться при синтезе данных на основе включения в них как минимум двух составляющих: а) критерия информативности параметров радиобалансной (контрастно-яростной) модели природной среды для оценки ее деградации по данным аэрокосмического спектрометрирования; б) критерия информативности модели развития динамического процесса деградации экосистемы. Следовательно, при расчетах информативности данных спектрального дистанционного зондирования природных экосистем учет механизмов перераспределения интервалов наиболее информативных длин волн, пространственных частот и других параметров необходимо включать в качестве основы для определения синтезированных многоцелевых критериев информативности. С другой стороны, на разных иерархических уровнях развития деградирующего процесса критические переходы, обуславливающие изменения природной экосистемы, могут вовлекать новые процессы (например, климатические изменения), существенно меняющие основные элементы и структуру самой экосистемы. Здесь, несомненно, требуется искусство включения в синтезируемую информационную структуру новых компонент, что, несомненно, усложняет общую оценку информативности для аэрокосмических данных, связанных с глобальными изменениями окружающей среды [16].

Следует отметить, что для получения замкнутого цикла результатов в комплексе «планирование съемки – обработка данных» необходимо пройти несколько этапов. Во-первых, это выделение зон максимальных амплитуд и пространственно-временных масштабов для характерных градиентов деградации. Во-вторых, это анализ направлений для наиболее интенсивного распространения низкочастотных и особенно высокочастотных компонент динамических процессов. Очевидно, что распределение координат базовых участков съемки для зон устойчивой деградации и мобильно меняющихся направлений наиболее информативных участков зависит не только от типа деградации, но и стадии ее развития. Как показано в [17], для любой открытой нелинейной синергетической и неравновесной системы высокочастотная и низкочастотная компоненты поля измеряемых (моделируемых) величин отвечают за разные стороны динамических процессов. Именно, низкочастотная составляющая определяет элементную базу динамической системы (протяженные природные объекты), а высокочастотная компонента характеризует ее структуру (малоразмерные детали природной среды). Однако в любом случае оценка информативности процесса деградации природной среды должна быть адекватной условиям аэрокосмической съемки и сопоставимой на разных иерархических уровнях процесса деградации. Иными словами необходима единая информационная мера, естественным образом связанная с оптико-физическими характеристиками моделируемого или измеряемого поля излучения земной поверхности и, кроме того, инвариантная к изменениям условий аэрокосмической съемки. Предложенная в [7]

концепция информационных функционалов калибровки (ИФК) предлагает использовать их в следующем виде:

$$K_V = \frac{\frac{1}{D^2}[r_\lambda]_{(x,y)}}{\langle r_\lambda \rangle_{(x,y)}} = \frac{\frac{1}{D^2}[\bar{\rho}_\lambda]_{(x,y)}}{\langle \bar{\rho}_\lambda \rangle_{(x,y)} - \rho_{atm,\lambda}} \neq \mu_\lambda(\tau_0, \eta, \tau). \quad (7)$$

Функционалы информационной калибровки K_V получаются вычислением средних $\langle \bar{\rho}_\lambda \rangle_{(x,y)} \dots \langle r_\lambda \rangle_{(x,y)}$ и дисперсий $D^2[\bar{\rho}_\lambda]_{(x,y)} \dots D^2[r_\lambda]_{(x,y)}$ поля излучения горизонтально-неоднородной подстилающей поверхности по координатам (x, y) в результате статистической обработки величины спектрального коэффициента яркости $\bar{\rho}_{x,y,\lambda}$ системы «атмосфера – подстилающая поверхность» на оптическом уровне $(\tau - \tau_0)$, где τ и τ_0 — оптические глубина и толщина земной атмосферы соответственно. В формуле (7) величина $\bar{\rho}_\lambda$ — спектральный коэффициент яркости системы «атмосфера – подстилающая поверхность», $\rho_{atm,\lambda}$ — спектральный коэффициент яркости свободной атмосферы, r_λ — спектральный коэффициент отражения подстилающей поверхности согласно наземным измерениям. Согласно предположению о независимости спектрального (λ) и углового (η, ξ, φ) хода величины r_λ ее можно приближенно представить в каждой точке (x, y) подстилающей поверхности следующим выражением [5]:

$$r_\lambda(\eta, \xi, \varphi) = \Omega(\lambda)R(\eta, \xi, \varphi). \quad (8)$$

Используя (8), находим инвариантное соотношение для коэффициентов вариации K_V , вычислив их согласно (7). Из формулы (7) следует, что величина K_V не зависит от суммы прямой и диффузной прозрачностей атмосферы $\mu_\lambda(\tau_0, \eta, \tau)$ на произвольном оптическом уровне τ в силу свойств инвариантности (7), а также от спектрального хода функции $\Omega(\lambda)$ в силу свойства (8).

3. Калибровочные модели параметров состояния деградирующих экосистем

Перейдем теперь к анализу спектральных полей пространственной яркости и контрастов яркостей системы «объект – фон» для природных экосистем. Исследование динамики контрастов спектрально-оптических характеристик деградирующих природных экосистем дает основание моделировать их взаимосвязь с частотно-пространственными и временными характеристиками многомасштабных динамических процессов, формирующих ландшафт угнетенной экосистемы. За периоды деградации угнетенная экосистема претерпевает значительные изменения различных пространственно-временных масштабов. В этом смысле для реализации наиболее полных возможностей измерений или соответствующего имитационного моделирования важно воспроизвести неоднородные условия деградации природной экосистемы на достаточно представительной территории, охватывающей по временному интервалу и пространственной выборке определенное разнообразие климатогеографических зон,

ландшафтов, типов рельефа, метеоусловий и рельефа. При этом расширяются условия наиболее полного наблюдения моделируемой экосистемы относительно представления спектров деградации на разных стадиях, соответствующих различным масштабам пространственно-временной изменчивости ее параметров. В качестве примера приведем процессы обезлесования (опустынивания) в районе южного побережья Каспийского моря. Для идентификации различных стадий этих процессов использовались пространственно-временные признаки распределения яркостных контрастов и радиационного баланса, соответствующие наиболее информативным масштабам деградации. Физические механизмы пространственно-временной изменчивости радиационного баланса объясняют неустойчивость деградирующей экосистемы, переходящую в запороговую область, определяемую критическим масштабом деградации.

На рис. 1 представлены полученные со спутника Landsat-TM космические изображения лесных зон Азербайджана в районе южного побережья Каспия. В качестве доминирующего фактора на фоне влияния других антропогенных и природных факторов данные рис. 2 иллюстрирует эффект долговременной динамики метеопараметров лесной экосистемы в указанной прибрежной зоне, как результат изменчивости, обусловленной процессом обезлесования.

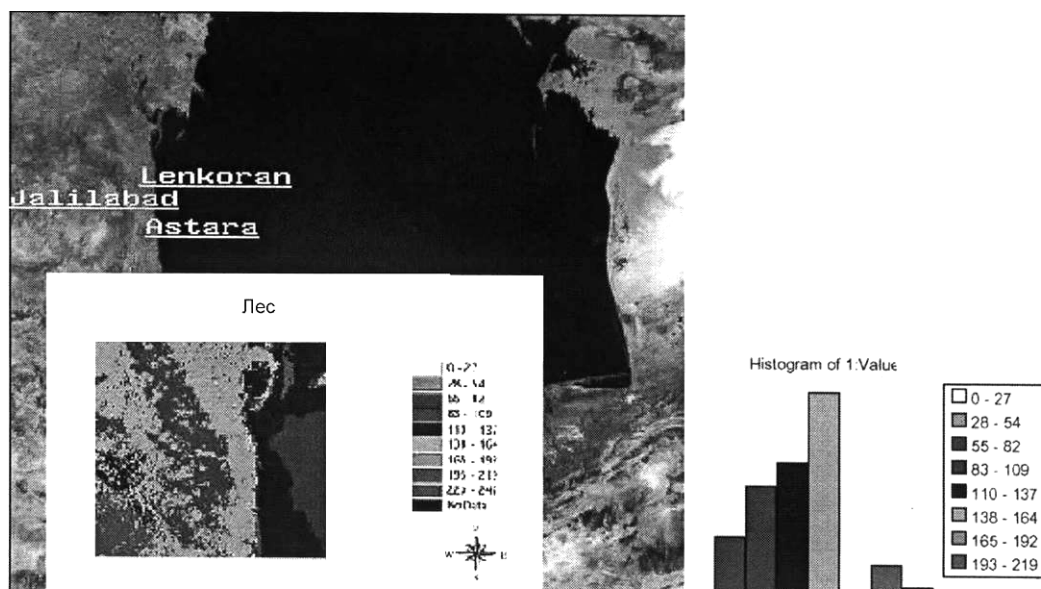


Рис. 1. Космические изображения лесных зон Азербайджана в районе южного побережья Каспия, полученные со спутника Landsat-TM.

На рис. 2 прослеживается повышение среднегодовой температуры и увеличение годовой нормы осадков (особенно за десятилетний цикл). Таким образом, в этой лесной субтропической зоне на юго-западном побережье Каспия наблюдаются региональные изменения климата в сторону более засушливых сезонов. Очевидно, что немаловажным фактором этого процесса является уменьшение площадей лесных массивов в результате многолетних и систематических вырубок. Однако в наши задачи не входило исследование региональных климатических изменений в зависимости от деградации лесных экосистем. Поэтому главное внимание в данной работе уделено анализу возможностей, связанных с использованием динамических имитационных моделей природных экосистем. Эти модели включают спектрально-радиационные характеристики экосистем, которые необходимы для поиска наиболее информативных облас-

тей, определяющих параметры их состояний с целью выработки единых метрик информационной калибровки соответствующих дистанционных данных.

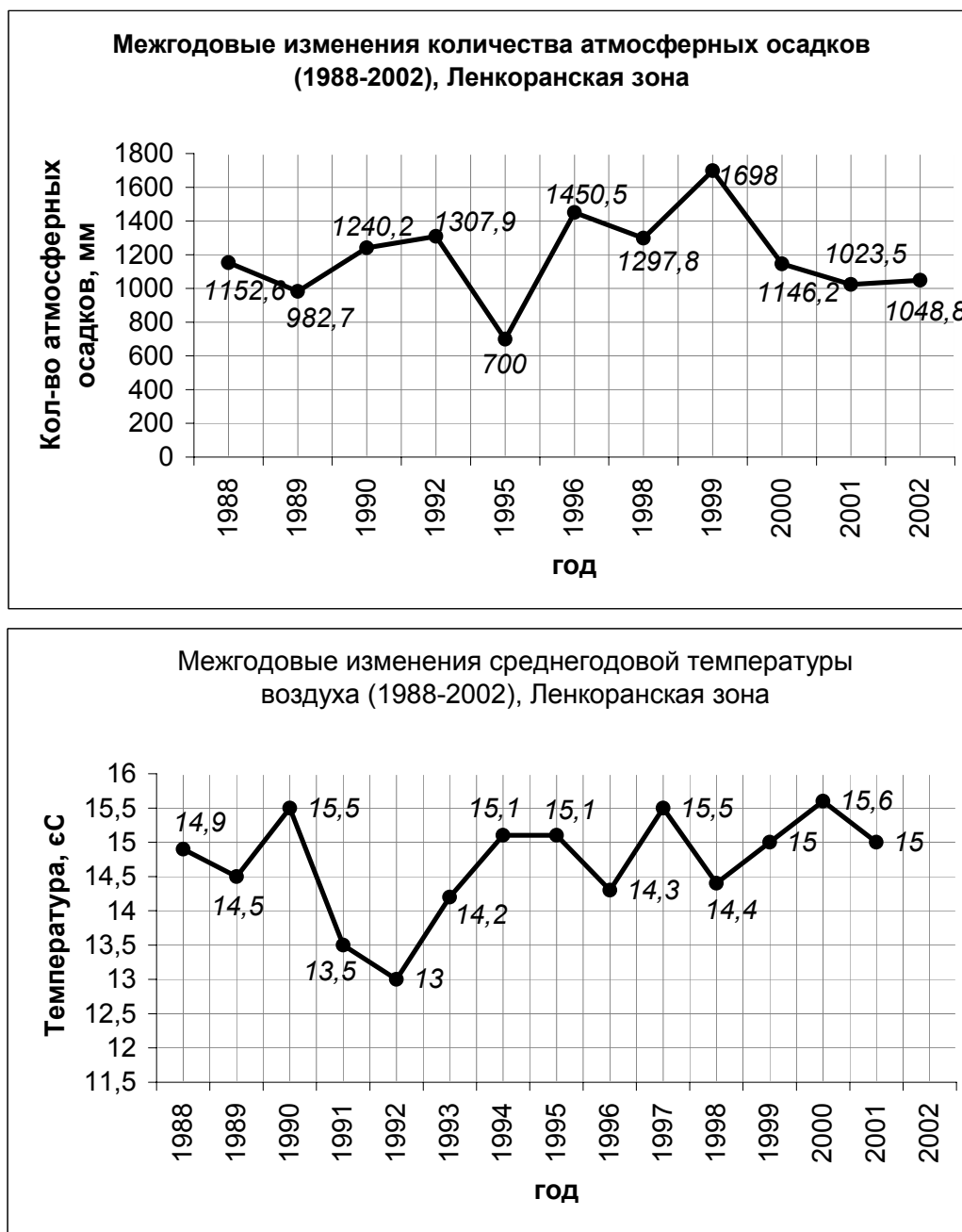


Рис. 2. Многолетняя динамика метеопараметров (температуры и осадков) в характерных областях обезлесования прибрежной субтропической экосистемы на юго-западном побережье Каспийского моря (Ленкоранская зона).

Для оценки наиболее информативных диапазонов, характеризующих динамические свойства природных экосистем, в рамках общепринятых моделей динамики популяций (биомассы) и наряду с анализом всех возможных состояний (бифуркаций, предельных циклов и т. д.) рассмотрим свойства самоорганизующихся диффузно-диссипативных структур на основе решений системы следующих дифференциальных уравнений [18]:

$$\frac{dN(r,t)}{dt} = F_1(N,R) + D_N \frac{\partial^2 R}{\partial r^2}, \quad (9)$$

$$\frac{dR(r,t)}{dt} = F_2(N,R) + D_R \frac{\partial^2 R}{\partial r^2}. \quad (10)$$

В уравнениях (9)–(10) используются обозначения: N — плотность популяции (биомассы), R — плотность пространственно-временного распределения яркостных контрастов, формирующих на критических частотах ν_i динамику радиационного баланса экосистемы, D_N и D_R — коэффициенты диффузии (плотности биомассы и яркостного контраста, соответственно), $r(x,y)$ — радиус-вектор в плоскости (x,y) распространения деградации, $F_1 = A + N(B - NR) - CR$ — функция дрейфа плотности популяции (биомассы), $F_2 = -LN + \frac{\partial R}{\partial t} + f_R(\nu_0)$ — функция дрейфа пространственно-яркостных контрастов с флуктуирующей составляющей $f_R(\nu_0)$, где ν_0 — минимальная частота долгопериодической составляющей флуктуаций, параметры A, B, C, L — константы динамической системы. Диффузионные составляющие определяются регулярными процессами выравнивания распределений биомассы и радиационного баланса в результате распространения горизонтальных потоков, определяемых пространственной неоднородностью природной среды.

В отличие от классических консервативных колебательных систем типа маятника или модели популяции (биомассы) с нейтрально-устойчивым состоянием равновесия, когда любое нарушение меняет параметры устойчивости динамической системы, в уравнениях (9)–(10) учитываются диффузионные составляющие, которые регулируют пространственно-временное распространение компонент. Учитываемые нелинейные и диффузионные члены позволяют дополнительно выявить новые механизмы пространственно-временного взаимодействия, которые расширяют спектр возможных состояний природной экосистемы и условия их реализации (устойчивости, неустойчивости, промежуточные состояния). Для исследования этих свойств природных экосистем рассмотрим сначала несколько предельных случаев (циклов). Определим параметры системы и оценим их характерные значения для этих предельных состояний. Затем определим, какие параметры несут основную информацию об экосистеме, позволяющие на их основе построить единую информационную калибровочную метрику.

Решение линеаризованной системы уравнений (9)–(10) в случае экспоненциальной временной зависимостью $\exp\{vt\}$ эволюции динамической системы (N^*, R^*) , при ненулевых условиях стационарности и в приближении малости вклада диффузионной составляющей (вблизи двух крайних точек пространственной однородной среды) может быть представлено в следующем виде:

$$\begin{pmatrix} N^* \\ R^* \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{f}{L} \\ L \frac{AL + fB}{f^2 + CL^2} \end{pmatrix}. \quad (11)$$

Для определения области устойчивости решения системы уравнений (9)–(10) вблизи стационарных точек необходимо варьировать управляющие параметры

динамической системы, начальные условия и флуктуационные составляющие. Вариации этих величин меняют картину распределения плотности популяции (биомассы) и радиационно-оптических контрастов, эволюция которых во вполне конкретных масштабах определяет наблюдаемый дрейф метеопараметров.

Пространственные распределения плотностей популяции (биомассы) и яркостных контрастов радиационного баланса можно выразить через собственные функции $N_m(r)$, $R_m(r)$ и собственные значения k_m^2 следующих краевых задач, определяемых операторами Лапласа и моделирующими диффузионные процессы в деградирующей лесной экосистеме:

$$\Delta N_m(r) = -k_m^2 D_N N_m(r), \quad \Delta R_m(r) = -k_m^2 D_R R_m(r). \quad (12)$$

Характеристическое уравнение для системы уравнений (12) имеет вид:

$$\det \begin{vmatrix} V - k_m^2 D_N - \nu_m & -C - 2f/L \\ -L & k_m^2 D_R - \nu \end{vmatrix} = 0, \quad (13)$$

где величина $V = B - 2f \frac{AL + fB}{f^2 + CL^2}$ определяет кинетическую составляющую динамической системы. Частотные моды ν_m диффузионного процесса, связанные с собственными значениями k_m^2 , равны

$$\nu_m = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} k_m^2 D_{R-N} + V + \left[\left(k_m^2 D_{R+N} - V \right)^2 + 2k_m^4 D_R D_N + 8f + 4LC \right]^{\frac{1}{2}} \\ k_m^2 D_{R-N} + V - \left[\left(k_m^2 D_{R+N} - V \right)^2 + 2k_m^4 D_R D_N + 8f + 4LC \right]^{\frac{1}{2}} \end{pmatrix}, \quad (14)$$

где

$$k_m^2 D_{R-N} = k_m^2 (D_R - D_N), \quad k_m^2 D_{R+N} = k_m^2 (D_R + D_N). \quad (15)$$

При последующем рассмотрении в стационарных решениях системы уравнений (12), рассчитанных с диффузионной добавкой, управляющие параметры динамического процесса преобразуются к виду

$$f \Rightarrow f + k_m^2, \quad C \Rightarrow C - D_R, \quad AL + fB \Rightarrow AL + (f + k_m^2)B - (f + k_m^2)D_N. \quad (16)$$

В данном случае в отличие от случаев устойчивости системы ($\nu_m \leq 0$) и использования традиционной модели популяции (биомассы) с нейтральной устойчивостью, когда выполняются условия с вращением вокруг стационарного состояния

$$\operatorname{Re} \nu_m = 0, \quad \operatorname{Im} \nu_m = \pm \frac{1}{2} \left(B^2 + 4LC \right)^{\frac{1}{2}}, \quad (17)$$

имеем неустойчивую систему с предельным циклом устойчивости. Характерно, что в этом случае неустойчивые моды ν_m определяют пространственную составляющую диффузионного процесса в силу зависимости от собственных значений k_m^2 согласно (14). Таким образом, информационная метрика, построенная на базе этой величины, потенциально несет содержательную информацию о пространственно-временном распределении популяций (биомассы) и контрастов яркостей природных экосистем в результате нестационарных эволюционно-диффузионных процессов.

На рис. 3 представлены имитационные кривые фазовой картины моделируемой деградирующей лесной экосистемы на плоскости (R, N) и ее эволюция от затухания (деградации) к новому устойчивому состоянию, возникающему при дрейфе параметров системы и учете флуктуационной составляющей. На рис. 3а представлена имитационная фазовая картина в плоскости (R, N) : плотность распределения в системе «яркостный контраст – биомасса деградирующей динамической экосистемы», моделируемая вышеприведенной системой уравнений (12). На рис. 3б представлена трехмерная эволюция деградации указанной системы с переходным режимом от неустойчивости к возникающему предельному циклу устойчивости с дрейфом в сторону снижения периода цикла. Нижняя кривая отображает кратковременную эволюцию, а верхняя спиралевидная кривая характеризует долговременную эволюцию лесной экосистемы.

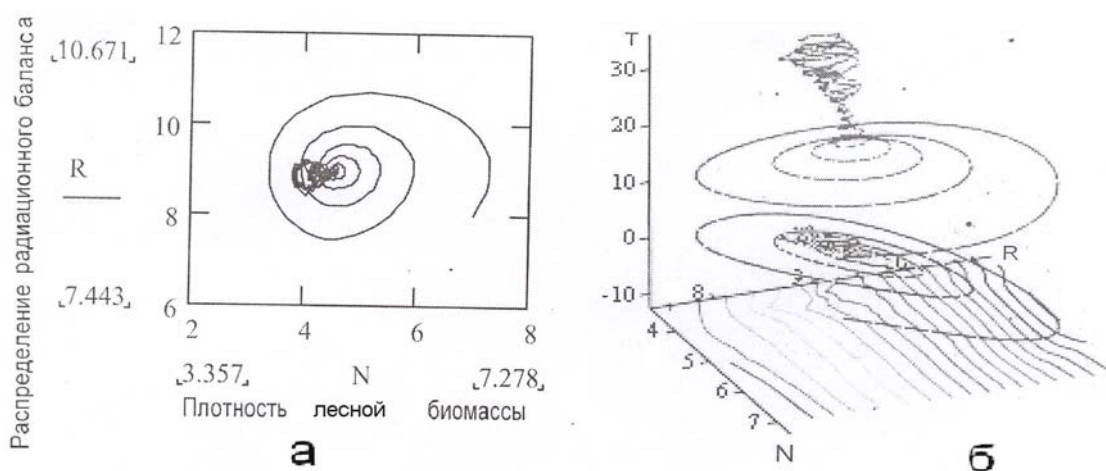


Рис. 3. Моделирование фазовой картины деградации природной экосистемы (лес) на плоскости (R, N) .

а — двумерная эволюция на плоскости (R, N) ; б — трехмерная эволюция с переходным режимом от неустойчивого состояния к возникшему предельному циклу с дрейфом в сторону снижения периода цикла.

В отличие от фазовых траекторий в виде замкнутых concentрических линий (окружностей, эллипсов, овалов), обычно получаемых при использовании популяционной модели «Лотки–Вольтерра» [19], в рассматриваемом случае (рис. 3а) имеем неустойчивое состояние, выраженное спиралевидным закручиванием «деградации» с зарождающимся новым состоянием. Это состояние переходит в предельный цикл (циклический переход к раскручиванию спирали и обратно), ограниченный уже окружностью малого радиуса. На рис. 3б изображена трехмерная фазовая картина такого перехода, развернутая по вертикальной оси времени и отражающая динамику процесса перехода от деградации к новому состоянию лесной экосистемы. Аналогично может быть рассмотрена подобная трехмерная картина, развернутая по времени, но уже полностью деградирующей лесной экосистемы без перехода к новому состоянию (закручивающаяся спираль). Таким образом, использование данных моделей позволяет анализировать более широкий набор переходных режимов деградирующих лесных экосистем, тем самым расширяя возможность имитации новых прогнозируемых состояний угнетенной природной среды.

На рис. 4 с учетом влияния климатических и географических факторов представлены спутниковые изображения характерных областей, которые перспективны для изучения процессов деградации субтропических лесных экосистем с разной степенью устойчивости горно-лесной прибрежной зоны на юго-западном побережье Каспия (Джалилабадская и Ленкорань-Астаринская субтропические зоны).

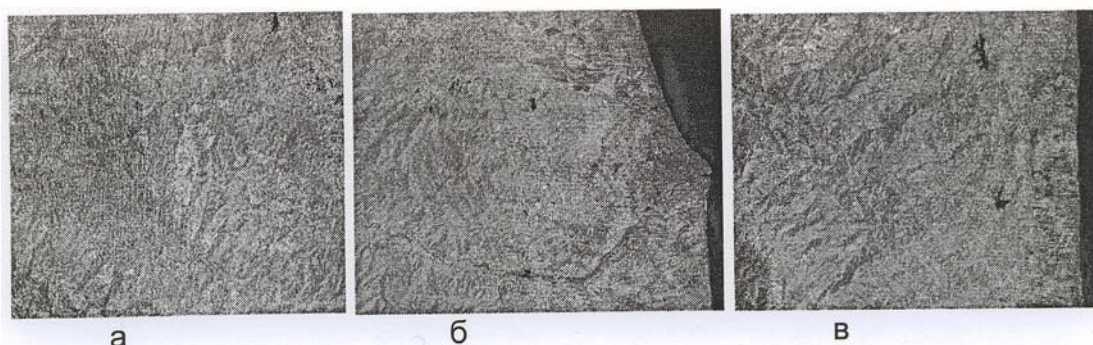


Рис. 4. Спутниковые изображения лесной экосистемы на юго-западном побережье Каспийского моря с различной степенью устойчивости (Landsat-TM).

а — участок Джалилабадской зоны неустойчивости с необратимым снижением плотности лесной биомассы; б — участок Ленкоранской зоны в предельном цикле с прогнозируемым спадающим дрейфом плотности лесной биомассы; в — участок Астаринской лесной зоны при переходе от области устойчивости к нейтральной области.

Все три зоны, изображенные на рис. 4 отличаются определенной климатической и географической спецификой. Джалилабадский участок, на рис. 4а, наиболее удален от морского побережья Каспия и отличается более континентальным климатом. Лес здесь практически отсутствует (незначительная скученность отдельных темных участков, рассеянных среди более светлых почвенно-растительных образований). Поэтому фазовая диаграмма, представленная на рис. 3б, наиболее соответствует этому состоянию. Долговременная изменчивость метеопараметров в зоне Джалилабадского участка, по-видимому, не коррелирует с малым процентом площадей вырубленных лесов, хотя общее обезлесование на всей территории указанной зоны должно влиять на дрейф климатических параметров в целом. Ленкоранский участок, представленный на рис. 4б, находится у самого морского побережья Каспия. Лесная экосистема здесь сильно деградирована, в основном, в прибрежной зоне. Значительно отступая, она сохраняет определенную плотность и скученность (резкая граница между светлой лесной экосистемой слева и темным побережьем справа). Астаринский участок, изображенный на рис. 4в, также как и Ленкоранская зона, находится вблизи морского побережья Каспия, но южнее и ближе к горному лесному массиву. Поэтому этот участок расположен в более влажной климатической области. Судя по многолетним метеорологическим данным отсутствие в этой зоне лесных массивов существенно повлияло на дрейф метеопараметров в сторону более засушливого климата (увеличение температуры и уменьшение осадков). Этот вывод справедлив и для Ленкоранского участка, но в менее определенной форме из-за его северного расположения с более сухим климатом и большей степени начальной урбанизации. По-видимому, для обоих случаев, особенно для Астаринского участка лесной экосистемы, более близкой является фазовая картина, изображенная на рис. 3а.

4. Трансформация информативности атмосферного оптического канала над зоной морских загрязнений

Как было отмечено выше, учет трансформирующего влияния аэрозольной земной атмосферы при выделении характерных спектральных контрастов яркости, необходимых для определения информационных метрик, играет важную роль. В этой связи в качестве характерного примера рассмотрим поле излучения системы «морская поверхность – атмосфера», в которой можно выделить следующие компоненты спектральной яркости:

- диффузно-отражающая компонента поля излучения морской поверхности;
- компонента поля излучения, сглаженная по спектру зеркальным отражением от поверхности моря;
- яркость атмосферной дымки, трансформирующая селективно по длине волны спектральный контраст яркости системы «морская поверхность – атмосфера».

В работе [20] показано сглаживающее влияние на поле отраженного излучения зеркальной морской поверхности и атмосферной дымки, уменьшающей спектральный контраст яркости. Имитационные модели, полученные на основе приближенных решений исходного уравнения переноса излучения с учетом горизонтальной диффузии солнечных фотонов над неоднородными подстилающими поверхностями [21], дают картину высотной пространственно-сглаживающей трансформации контрастов спектральной яркости над оптически неоднородными отражающими поверхностями. Между тем реальные данные высотного хода спектральных контрастов яркостей, моделируемые с помощью коэффициентов вариации, свидетельствуют о необходимости включения в имитационные решения уравнения переноса физических механизмов генерации пространственных флуктуаций, которые смогли бы объяснить в рассматриваемом случае осциллирующие скачки полей излучения природных сред. В этом случае выбор единой метрики информативности для идентификации объекта с заданной спектральной отражательной характеристикой необходимо проводить с учетом пространственной когерентности моделируемого оптического сигнала, отражаемого от идентифицируемого природного объекта, с флуктуирующими составляющими спектральных яркостей. Предлагаемый ниже подход позволяет использовать единую информационную метрику для калибровки аэрокосмических данных, учитывающей свойства пространственной когерентности Γ между регулярной (средней) составляющей $I_{\lambda,j}(x, y, \tau, \eta, \xi, \varphi, \tau_0, A)$ поля излучения и соответствующей ей флуктуаций измеряемого сигнала $\Delta I_{\lambda,j}(x, y, \tau, \eta, \xi, \varphi, \tau_0, A)$. В своей основе такой подход предполагает выделение оптимальных частотных диапазонов интерференции или радиусов корреляции для спектральных контрастов яркости, определяемых решениями исходных краевых задач теории переноса излучения, и соответствующими флуктуирующими составляющими поля излучения. Последние могут быть представлены в качестве аддитивных добавок к решениям исходного интегро-дифференциального уравнения переноса, которое для спектральной интенсивности излучения $I_{\lambda,j}$ в случае горизонтально-неоднородного отражающего дна имеет следующий вид [21]:

$$\begin{aligned} & \eta \frac{\partial I_{\lambda,i}}{\partial \tau} + \alpha_{\lambda}(z)^{-1} \sqrt{1-\eta^2} \cos \varphi \frac{\partial I_{\lambda,i}}{\partial \chi} + \alpha_{\lambda}(z)^{-1} \sqrt{1-\eta^2} \sin \varphi \frac{\partial I_{\lambda,i}}{\partial y} = \\ & = -I_{\lambda,i} + \frac{\Lambda_{\lambda}}{4\pi} \hat{L} \chi_{\lambda}(\gamma, \tau) I_{\lambda,i} + \frac{\Lambda_{\lambda}}{4} \chi_{\lambda}(\gamma_1, \tau) e^{-\frac{\tau}{\xi}}, \\ & \eta \in [-1, 1], \quad \xi \in [0, 1], \quad \varphi \in [0, 2\pi] \end{aligned} \quad (18)$$

Граничные условия для уравнения переноса излучения (18) представляются следующим образом:

$$\begin{aligned} & I_{\lambda}(0, x, y, \eta, \xi, \varphi, \tau_0) = 0, \quad \eta > 0 \\ & I_{\lambda}(\tau_0, x, y, \xi, \tau_0, A_{\lambda}) = \frac{A_{\lambda}(x, y)}{\pi} \int_0^{2\pi} d\varphi \int_0^1 I_{\lambda}(\tau_0, -\eta, \xi, \varphi) \eta' d\eta' + \\ & + A_{\lambda}(x, y) S_{\lambda} \xi e^{-\frac{\tau_0}{\xi}}, \quad \eta < 0 \end{aligned} \quad (19)$$

В краевой задаче (18)–(19) используются обозначения: \hat{L} — линейный интегральный оператор преобразования интенсивности излучения по угловым переменным η и ξ , x и y — текущие горизонтальные координаты зондируемой точки i вдоль трассы сканирования природной среды со спутника, $\alpha_{\lambda}(z)$ — спектральный коэффициент ослабления атмосферы, Λ_{λ} — спектральная вероятность выживания фотона при элементарном акте рассеяния, $\chi_{\lambda}(\cos \gamma)$ — спектральная атмосферная индикатриса рассеяния, γ_1 — угол рассеяния прямого солнечного излучения, A_{λ} — спектральное альbedo подстилающей поверхности, πS_{λ} — спектральная солнечная постоянная. Решения краевой задачи (18)–(19) традиционно представляются в виде суммы двух слагаемых, одно из которых выражает общее решение однородного уравнения (18), а другое — частное решение неоднородного уравнения (18). Однако в рамках предлагаемого подхода решения исходной краевой задачи (18)–(19) целесообразно представить в следующем виде:

$$\begin{aligned} & I_{\lambda,i}(x, y, \tau, \eta, \xi, \varphi, \tau_0, A_{\lambda}) = \bar{I}_{\lambda,i}(x, y, \tau, \eta, \xi, \varphi, \tau_0, \bar{A}_{\lambda}) + \\ & + \Delta I_{\lambda,i}(x, y, \tau, \eta, \xi, \varphi, \tau_0, A_{\lambda}) \end{aligned} \quad (20)$$

где $\bar{I}_{\lambda,i}$ — регулярная (средняя) составляющая поля излучения, $\Delta I_{\lambda,i}$ — флуктуации яркости, вызванные горизонтальной неоднородностью отражающей подстилающей поверхности, \bar{A}_{λ} — усредненное по (x, y) значение спектрального альbedo подстилающей поверхности.

При анализе и обработке спектрозональных изображений природной среды, получаемых с помощью специальной бортовой аэрокосмической аппаратуры, понятие информативности в пространстве частот ν вводится на основе функции взаимной когерентности $\Gamma_{\bar{I}_{\lambda,i}, \Delta I_{\lambda,i}}(\nu)$ [22]. В числителе этой функции

используется квадрат модуля Фурье-спектра корреляционной функции $\Phi_{\bar{I}_{\lambda,i}, \Delta I_{\lambda,i}}$, а знаменатель представляется произведением Фурье-спектров этих функций для взаимодействующих процессов, которые в нашем случае опреде-

ляются величинами $\Delta I_{\lambda,i}$ и $\bar{I}_{\lambda,i}$. Выделение информативных диапазонов пространственных частот $\{v_1^*, v_2^*, \dots, v_N^*\}$, от которых зависит оптимальная фильтрация (моды усиления) идентифицируемых контрастов яркостей, реализуется из следующего требования:

$$\{v_1^*, v_2^*, \dots, v_N^*\} = \text{Arg max}_{\bar{I}_{\lambda,i}, \Delta I_{\lambda,i}} \Gamma_{\bar{I}_{\lambda,i}, \Delta I_{\lambda,i}}(v). \quad (21)$$

На рис. 5 представлены снимки прибрежной зоны Каспийского моря, обработанные на основе выбора двух характерных пространственных частот v_1 и v_2 . Пространственно-частотная трансформация контрастов яркостей в данном случае обусловлена прибрежными нефтяными загрязнениями, мелководной замутненностью взвесью и загрязнениями, вызванными речными стоками.

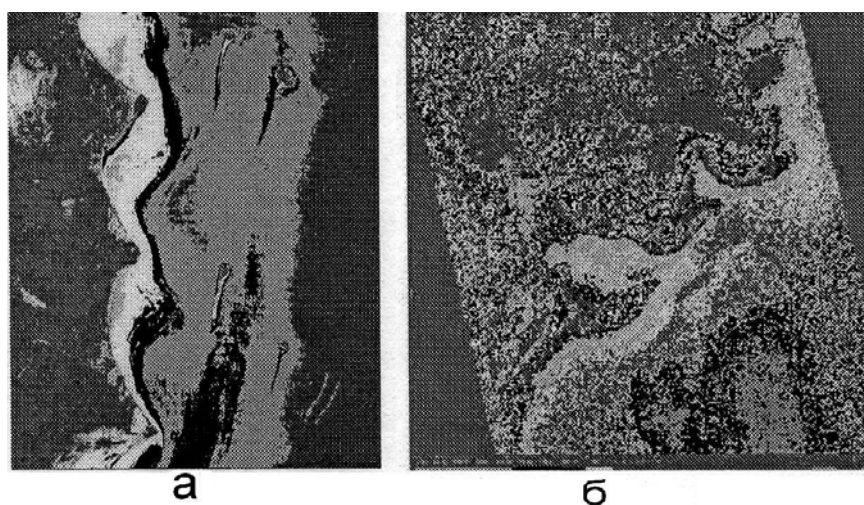


Рис. 5. Выделение зон пространственно-частотной когерентности для контрастов яркостей, характеризующих устойчивые области загрязнений в прибрежной зоне Каспийского моря.

а — низкочастотный диапазон, б — высокочастотный диапазон.

В сине-зеленой области спектра ($\lambda = 450 - 550 \text{ нм}$) для низкочастотного диапазона ($v = 0.1 - 0.3 \text{ км}^{-1}$) выделяются длинные темные шлейфы нефтяных загрязнений вдоль морского побережья (рис. 5а). В высокочастотном диапазоне ($v = 3 - 7 \text{ км}^{-1}$) заметны характерные для красно-зеленой области спектра ($\lambda = 550 - 680 \text{ нм}$) контрасты яркостей, определяющие замутненность мелководья взвесью и речными стоками (рис. 5б). Продолговатые темные полосы вдоль берега (рис. 5а) соответствуют прибрежному нефтяному загрязнению (мыс Бяндован Каспийского побережья). Участки загрязнения речными стоками и пятна замутненности прибрежных вод Каспия (Куринский мыс и Кызыл-Агачский заповедник) представлены на рис. 5б. В этих случаях собственные значения оптимизируемой информационной матрицы с элементами, зависящими от функции взаимной когерентности $\Gamma_{\bar{I}_{\lambda,i}, \Delta I_{\lambda,i}}(v)$, будут соответствовать тем пространственным частотам v , которые характеризуют процессы загрязнения, идентифицируемые на указанных снимках.

5. Модели оптимальных трасс аэрокосмической съемки деградирующей природной среды

Рассмотрим теперь модели оптимальных трасс аэрокосмической съемки деградирующих природных экосистем. В качестве тестового материала для соответствующих исследований были отобраны характерные участки деградации северной прибрежной зоны юго-восточной территории Каспийского моря. Эти участки расположенные в приграничной зоне России и Азербайджана, характеризуются типичными природными и антропогенными процессами (обезлесование, деградация прибрежной растительности, морские загрязнения, береговая эрозия). В представленном ниже анализе даны результаты обработки спутниковых данных по корреляции цветовых RGB-характеристик зондируемых природных объектов с параметрами состояния и свойствами этих объектов (содержание хлорофилла в растительности, состояние водоемов, почв, моря). Использовались стандартные методы расчетов колориметрических характеристик (параметры цвета, цветности и т.д.) известных классов объектов по многоспектральным данным [23]. В расчетные схемы включались этапы радиационной и атмосферной коррекции первичного сканерного сигнала в каждом из оптических каналов по результатам модельных расчетов спектральных зависимостей рассеянной и суммарной солнечной радиации от реальных параметров космической съемки (широта местности, угол солнцестояния, высота съемки, состояние облачности и др.). Такая имитационная структура расчетной схемы позволяла интерактивно проводить оценку и контроль рабочих характеристик аэрокосмической съемки в рамках оптимальных режимов (коэффициенты усиления, динамические диапазоны для каждого спектрального оптического канала и т.д.), используя предварительный экспресс-анализ каждой распознаваемой сцены.

На рис. 6 (верхний ряд) демонстрируются спектрально-зональные снимки, полученные с помощью одного из каналов самолетно-сканерных изображений, в 256-градационной шкале яркостей. Рассмотрены следующие спектральные классы природных образований, характерные для деградирующих участков прибрежной зоны Каспийского моря:

- 1) лес с участками вырубки;
- 2) морское побережье с песчаными участками почвенной эрозии;
- 3) бетонная взлетная полоса, окруженная почвенным покровом с деградирующим растительным покрытием;
- 4) культивируемые участки почвы вокруг бетонной дорожки.

Представленные изображения были затем преобразованы в цветные снимки согласно известным алгоритмам и таблицам преобразования к стандартам RGB [23]. Для приведения в соответствие полученных цветных изображений известных классов объектов к их естественным цветам проводились следующие процедуры:

- 1) нормировка сигнала сканера в каждом спектральном диапазоне на величину падающей солнечной радиации для известного времени съемки и широты местности с учетом спектрального хода солнечной постоянной и состояния облачности;

- 2) приведение нормированных данных радиационной коррекции к данным на нулевом уровне съемки (условно называемом лабораторным), из которых исключено влияние атмосферы на спектральный и угловой ход отраженного и пропущенного солнечного излучения;

3) использование априорной информации о спектральных яркостях характерных классов природных объектов, необходимой для визуализации результатов интерактивного анализа при матричном переходе от спектральных к колориметрическим характеристикам цветных изображений в системах RGB и XYZ;

4) оптимизация коэффициентов усиления спектральных спутниковых каналов согласно табл. 1.

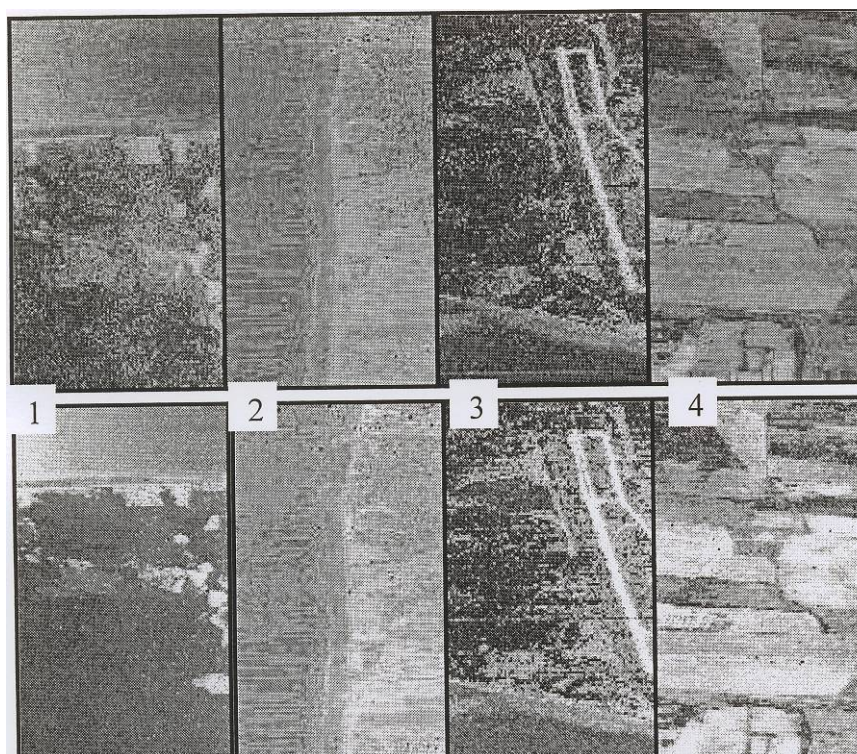


Рис. 6. Многозональные сканерные аэроснимки деградирующей прибрежной зоны Каспийского моря без учета (верхний ряд) и с учетом (нижний ряд) нелинейной поправки, учитывающей вклад многократного переотражения фотонов от подстилающей поверхности.

Для реализации предложенной методики потребовалась разработка комплекса программных модулей, позволяющих обрабатывать изображения в спектральных каналах от $\lambda = 400\text{нм}$ до $\lambda = 800\text{нм}$. При этом изображения необходимо было корректировать по их контрастности и яркости, меняя режимы усиления для каждого набора спектральных каналов в зависимости от анализируемой сцены и вида решаемой задачи.

Таблица 1

Коэффициенты усиления спектральных каналов N (нм) в различных диапазонах вариации сигнала (согласно значению отношения T)

T -отношение сигналов канала	K -коэффициент усиления				Характерный спектральный класс природного образования
	$N = 2$	$N = 3$	$N = 6$	$N = 7$	
800 нм 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	8	1	1	Почва

Из табл. 1 видны характерные режимы усиления спектральных каналов, позволяющие провести корректировку динамических диапазонов сканерной спутниковой системы. Это дает возможность использовать в последующем анализе достоверную обработку на уровне распознавания основных классов природных объектов. В частности, при решении гидрооптических задач планировалась перенормировка коэффициентов усиления в сторону их увеличения в коротковолновой области спектра с соответствующим ослаблением в красной и ближней инфракрасных областях спектра. Заметим, что обработка космических изображений проводилась для разных уровней регистрируемой солнечной радиации (в зависимости от условий съемки) при использовании алгоритма перехода между натурными и лабораторными данными. При этом учет влияния такого важного физического эффекта, как многократное переотражение солнечных фотонов от подстилающей поверхности, требовал проведения соответствующей коррекции спектральной оптической информации, которая учитывала бы нелинейный характер указанного процесса. На рис. 6 (нижний ряд) демонстрируются результаты такой коррекции для многозональных сканерных изображений участков деградирующих природных экосистем.

Помимо модулей коррекции, предварительной нормировки сигнала и перехода к цветовому представлению специально разработанное программное обеспечение включает также модули для выбора оптимальных режимов коэффициентов усиления каждого спектрального канала сканирования. Программа адаптирует чувствительность каналов для каждой сцены по соответствию задаваемых спектральных классов естественным цветам изображения объектов. Разработанные программы интерактивной имитации сцены позволяют также строить оптимальные стратегии сканирования и координатного позиционирования наиболее информативных участков зондируемой подстилающей поверхности. В табл. 2 представлены результаты вычисления и поиска наиболее информативных участков для аэрокосмических сканерных съемок деградирующих природных экосистем. Величина информативности — основной критерий для планирования оптимальной стратегии координатного позиционирования сканируемых участков. Вычисляя режимы взаимодействия каждой пары выбранных сегментов изображений, определяем для всех этапов процесса деградации максимально информативные переходы, характеризующие увеличение количества информации между указанными парами. В результате определяются соответствующие им координаты и направления процессов деградации, для которых на каждом последующем этапе их развития необходимо проводить дистанционное сканирование угнетенной природной среды.

Таблица 2

Оптимально информативные JK-пары комбинаций для 12 сегментов спутниковых изображений деградирующей прибрежной зоны Каспийского моря (Ландсат-ТМ)

<i>Шаг</i>	<i>Сегмент J</i>	<i>Сегмент K</i>	<i>Количество 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 рис. 7 представлены сегментированные многозональные изображения деградирующей прибрежной зоны Каспийского моря, полученные со спутника Landsat-TM. Эти изображения, так же как и данные табл. 2, иллюстрируют поисковую стратегию самолетного сканирования и 5-этапного координатного позиционирования наиболее информативных участков деградации указанной природной зоны в соответствии с этапами развития наблюдаемого экологического процесса.

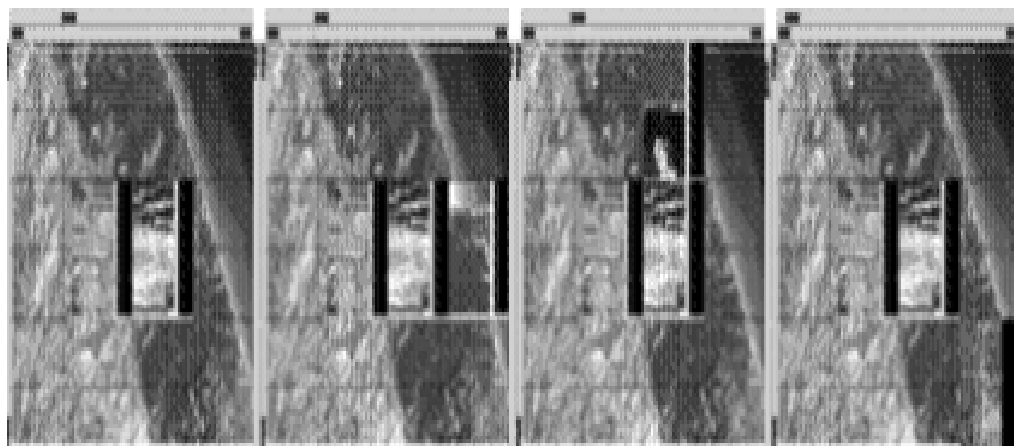


Рис. 7. Сегментированные многозональные изображения деградирующей прибрежной зоны Каспийского моря (Landsat-TM).

Согласно разработанной методике снимок Landsat-TM для исследуемой прибрежной зоны разбивался на 12 (или более) сегментов-участков, подверженных разной степени деградации. На каждом сегменте вычислялось пространственное распределение оптических контрастов яркостей и радиационного баланса, по амплитуде которого определяется интенсивность нарушения, а по пространственным частотам — направление распространения деградации. Там, где нулевая частота являлась доминирующей, независимо от интенсивности нарушения выбирались базовые координаты сканирования, от которых идет отсчет (этап 1). Все последующие координаты распространения деградации определялись по направлению максимальной изменчивости между парами выбранных сегментов для более высокочастотных составляющих радиационного баланса, вносящих максимальный вклад в увеличение полезной информации о деградации экосистемы.

Рассмотрим теперь в рамках указанных выше проблем базовые модули оптимального планирования спутниковых измерений полей яркости, используемые для решения некоторых задач дистанционного зондирования Земли из космоса. Общая постановка и решение задач планирования дистанционных измерений пространственно-угловых распределений поля излучения, рассеянного и отраженного системой «поверхность Земли – атмосфера», заключается в оптимизации функционалов, построенных на базисных векторах функции отклика в виде оцениваемой (обычно полиномиальной) регрессии, моделирующей приближенное решение исходной краевой задачи (18)–(19) [24]. Выразим регрессионное решение исходного уравнения переноса (18) излучения с помощью рядов Фурье вида

$$f(\hat{x}) = \sum_{n=0}^N C_n P_n(\hat{x}), \quad \hat{x} = \cos \gamma, \quad \gamma \in [0, 2\pi], \quad n = 0, 1, \dots, N, \quad (22)$$

где C_n — коэффициенты регрессии и $P_n(\hat{x})$ — полиномы Лежандра. Для полиномов Лежандра $P_n(\hat{x})$ используем традиционное классическое представление:

$$P_n(\hat{x}) = \frac{1}{n!} \frac{d^n}{d\hat{x}^n} (\hat{x}^2 - 1)^n, \quad \hat{x} \in [-1, 1] \quad n = 0, 1, \dots, N. \quad (23)$$

В случае учета азимутальных гармоник поля излучения для этих полиномов справедливо выражение в виде следующего ряда [25]:

$$P_n(\hat{x}) = P_n^0(\eta)P_n^0(\xi) + 2 \sum_{m=1}^N \frac{(n-m)!}{(n+m)!} P_n^m(\eta)P_n^m(\xi) \cos m\varphi, \quad (24)$$

где $P_n^m(\hat{x})$ — присоединенные полиномы Лежандра, определяемые согласно известному соотношению

$$P_n^m(\hat{x}) = (\hat{x}^2 - 1)^{\frac{m}{2}} \frac{d^m}{d\hat{x}^m} P_n(\hat{x}), \quad (25)$$

$$\hat{x} \in [-1, 1], \quad n = 0, 1, \dots, N, \quad m = 0, 1, \dots, N$$

В соотношении (24) величина $\hat{x} = \cos \gamma = \pm \eta \xi + \sqrt{(1-\eta^2)(1-\xi^2)} \cos \varphi$. Спектр оптимального плана в точках $x_j^* \in (-1, 1), j = 1, 2, \dots, N$ при углах (η, ξ, φ) ищется согласно условию [26]:

$$\{x_j^*\}^T = \underset{\hat{x}}{\text{Arg sup}} D[P_n(\hat{x})]. \quad (26)$$

В алгоритме (26) величина $D[P_n(\hat{x})]$ представляет функционал от полиномов Лежандра $P_n(\hat{x})$, соответствующий в данном случае D -критерию оптимальности, т.е. определителю дисперсионной матрицы оценок \mathbf{D} , оптимизируемой в точках оптимального плана. Очевидно, что элементы матрицы Фишера $\mathbf{F} = \mathbf{P} \times \mathbf{P}^T$, где символ T обозначает операцию транспонирования матрицы, для этого случая строятся на базисных векторах регрессии, т.е. полиномах $P = P_n(\hat{x})$. В результате мы получаем оптимальные распределения углов регистрации излучения $x_j^* \in (-1, 1)$, фактически зависящие только от степени полиномов Лежандра $P_n(\hat{x})$, но, как известно, не от значений оцениваемых параметров.

6. Функция эффективности оптимального плана с априорной информацией

Рассмотрим теперь построение спектра построения оптимального плана в тех случаях, когда для повышения его эффективности необходимо использовать априорную информацию. При поиске спектра оптимального плана согласно критерию MV-оптимальности

$$\max_{\hat{x}} D\{[P_n(\hat{x})], E(\hat{x})\} = E(\hat{x})P^T (P \times P^T)^{-1}P \quad (27)$$

анализ информации о распределении дисперсии D проводится по всей области изменения измеряемых (моделируемых) параметров. На основе этого ана-

лиза можно учесть априорную информацию с помощью введения функции эффективности плана $E(\hat{x})$. Требование введения функции эффективности плана, получаемой на основе априорной информации, оправдано, например, при более детальных измерениях в таких углах, где точность измерений невысока. В частности, при высокой дисперсии из-за сильных осцилляций в точках обрезания используемых регрессионных рядов или резких пиков атмосферной индикатрисы рассеяния $\chi(\cos \gamma)$ в конкретных моделях аэрозольной земной атмосферы.

В качестве примера рассмотрим построение спектров оптимального плана при аппроксимации атмосферной индикатрисы рассеяния $\chi(\hat{x})$ с помощью полиномов Лежандра $P_n(\hat{x})$. Как известно оптимальное распределение точек плана для оценки параметров регрессии будет совпадать с распределением нулей этих полиномов, соответствующих старшей степени многочлена, представляющего регрессию. На рис. 8 иллюстрируется кривая информативности угловых измерений с нормативными точками оптимального плана по всей области распределения измеряемых параметров. Очевидно преимущество центра и краев изображенной кривой информативности. Между тем часто необходимо использовать априорную информацию по всей области измерений, например, о распределении дисперсии. Дисперсионные распределения можно рассматривать как исходные при решении задачи поиска наилучшего приближения атмосферной индикатрисы рассеяния с помощью полиномов Лежандра $P_n(\cos \gamma)$.

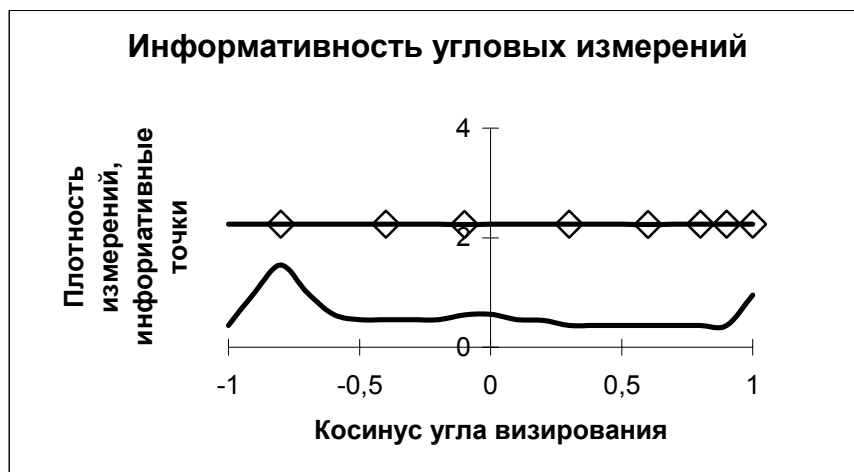


Рис. 8. Информативность угловых измерений, вычисленная по критерию D -оптимальности по всей области распределения измеряемых параметров. Крестиками обозначены оптимально информативные точки, вычисленные согласно исходному плану по критерию D -оптимальности, ромбиками показано распределение информативных точек измерений, вычисленных по критерию MV -оптимальности.

На рис. 9 показано изменение распределения информативности в точках (углах) оптимального плана после введения экспоненциальной (с отрицательной степенью) функции эффективности $E(\hat{x})$.

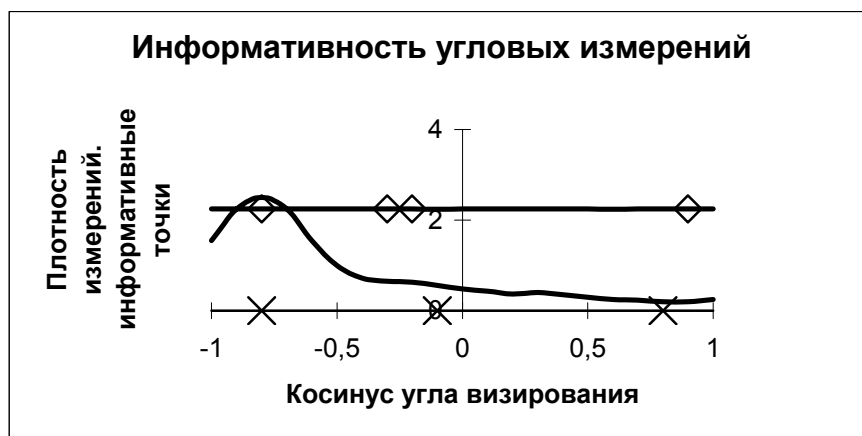


Рис. 9. Перераспределение информативности и плотности измерений по всей области измерений соответственно введенной экспоненциальной (с отрицательной степенью) функции эффективности $E(\hat{x})$. Крестиками обозначены оптимально информативные точки согласно исходному плану по критерию D -оптимальности, ромбиками показано распределение информативных точек измерений, вычисленных по критерию MV -оптимальности.

На рис. 10–11 представлены распределения информативности для модельных трех- и четырехчленных атмосферных индикатрис рассеяния.

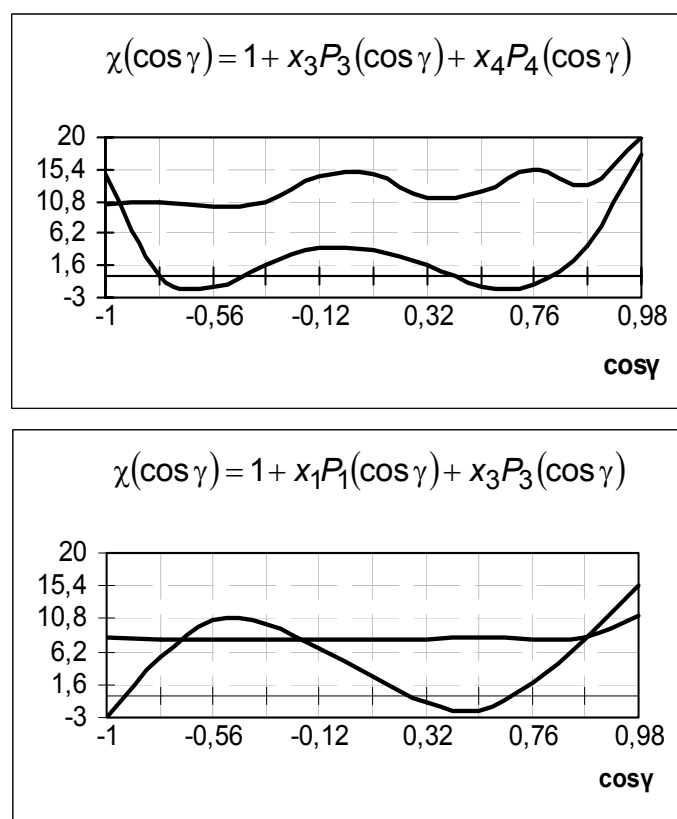


Рис. 10. Распределение информативности для модельных трехчленных атмосферных индикатрис рассеяния $\chi(\cos \gamma)$.

Дисперсионная (верхняя) кривая трехчленной индикатрисы рассеяния (рис. 10) согласно MV -критерию оптимального плана соответствует 6 измере-

ниям для линейной комбинации полиномов Лежандра $P_n(\cos \gamma)$, с различными членами приближения регрессионного ряда (нижняя кривая).

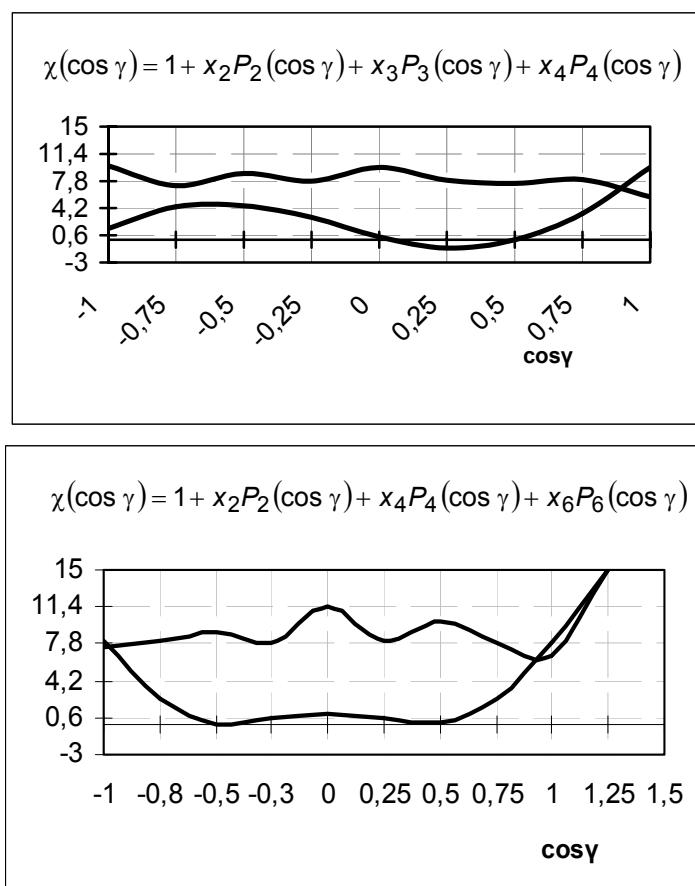


Рис. 11. Распределение информативности для модельных четырехчленных атмосферных индикатрис рассеяния $\chi(\cos \gamma)$.

Дисперсионная (верхняя) кривая четырехчленной индикатрисы рассеяния (рис. 11) согласно MV -критерию оптимального плана соответствует 6 измерениям для линейной комбинации полиномов Лежандра $P_n(\cos \gamma)$, с различными членами приближения регрессионного ряда (нижняя кривая).

Кривые, представленные на рис. 10–11, показывают некоторые вариации информативности при изменении числа параметров n и количества планируемых измерений (дискретности) N . При этом учтена связь оптимального числа $1 + N(N + 1)/2$ измерений с числом оцениваемых параметров модели n . Из рис. 10–11 следует, что имитационная модель атмосферной индикатрисы рассеяния, $\chi(\cos \gamma)$ аппроксимируемая регрессионным рядом по полиномам Лежандра $P_N(\cos \gamma)$ теряет свою информативность уже при пяти параметрах (членов ряда) и планируемых 15 измерениях по сравнению с десятиточечными планами для четырехпараметрической модели. При этом планы по оценке трехпараметрической модели соответственно в 6 точках измерений также менее информативны, но информативнее пятнадцатичленных планов для пятипараметрической модели.

7. Регуляризация оптимальной аппроксимации атмосферной индикатрисы рассеяния

Поиск оптимальной аппроксимации атмосферной индикатрисы рассеяния $\chi(\cos \gamma)$ предполагает предварительную регуляризацию исходной некорректной обратной задачи. При этом решение проблемы параметризации функции $\chi(\cos \gamma)$ и поиск оптимального плана для определения соответствующих точек измерения (вычисления) необходимо рассматривать как последовательные процедуры единого цикла. В качестве аппроксимируемой атмосферной индикатрисы рассеяния $\chi(\cos \gamma)$ используем известную модель Хенни-Гринштейна [25]

$$\chi(\cos \gamma, l) = \frac{1 - l^2}{(1 - 2l \cos \gamma + l^2)^{\frac{3}{2}}}, \quad (28)$$

где $l \in [0, 1]$ — параметр вытянутости индикатрисы рассеяния в направлении «вперед» $\gamma = 0^\circ$.

В рамках указанного цикла решение задачи регуляризации оптимального плана с помощью множителей Лагранжа $\tilde{\lambda}$ основано на более общем подходе, чем в известном методе наименьших квадратов [26]. Как правило, решение обратных задач ДЗПР достигается методом регуляризации некорректной задачи по Тихонову [27]. Так поиск наилучшей аппроксимации функции $\chi(\cos \gamma)$ с помощью регрессионных рядов полиномов Лежандра $P_n(\hat{x})$ формально реализуется в рамках регуляризации некорректной задачи посредством оптимизации функционала

$$U = (\chi - \hat{\Lambda}F)^T (\chi - \hat{\Lambda}F) + \tilde{\lambda}(F - F_0)^T (F - F_0). \quad (29)$$

Оптимизация функционала (29) приводит к решению линейной задачи

$$F(\tilde{\lambda}) = (\hat{\Lambda}^T \hat{\Lambda} + \tilde{\lambda} \hat{I})^{-1} (\hat{\Lambda} \chi + F_0) \quad (30)$$

для поиска оптимальных значений множителей Лагранжа $\tilde{\lambda}$, минимизирующих ошибку аппроксимации $|\chi(\cos \gamma) - \hat{\Lambda}F(\tilde{\lambda})|^2$. В формуле (30) величина F — имитационная функция атмосферной индикатрисы $\chi(\cos \gamma)$, аппроксимируемая рядом по полиномам Лежандра $P_n(\hat{x})$, $\hat{\Lambda}$ — матрица преобразования (усреднения) аппроксимируется в нашем случае функцией Хевисайда $\Phi(\hat{x} - a)$, F_0 — пробная функция имитационного моделирования, \hat{I} — единичная матрица. В нулях полиномов Лежандра $P_n(\hat{x})$, используемых для приближения с помощью соответствующих регрессионных рядов, определяются точки спектра оптимального плана.

Проведем моделирование первичных атмосферных параметров для оценки приближенных решений исходного уравнения переноса излучения (18) на

основе трехчленной индикатрисы рассеяния $\chi(\cos \gamma) = \sum_{n=0}^2 x_n P_n(\cos \gamma)$. Таким образом, для функции $\chi(\cos \gamma)$ используется приближение отрезком ряда Фурье в

виде трех первых членов ее разложения по полиномам Лежандра $P_n(\hat{x}) = P_n(\cos \gamma)$. Коэффициенты x_n разложения заданной индикатрисы рассеяния $\chi(\cos \gamma)$ определяются в интервале $\cos \gamma \in [-1, 1]$ согласно формуле [25]

$$x_n = \frac{2n+1}{2} \int_0^{2\pi} \chi(\cos \gamma) P_n(\cos \gamma) \sin \gamma d\gamma \quad (31)$$

$$n = 0, 1, 2, \dots, N$$

На рис. 12 иллюстрируются соответствующая трехчленная аппроксимация атмосферной индикатрисы рассеяния $\chi(\cos \gamma)$. Приведены также индикатриса рассеяния Хеньи-Гринштейна (28) и пробная функция имитационного моделирования F_0 в качестве входной функции при регуляризации.

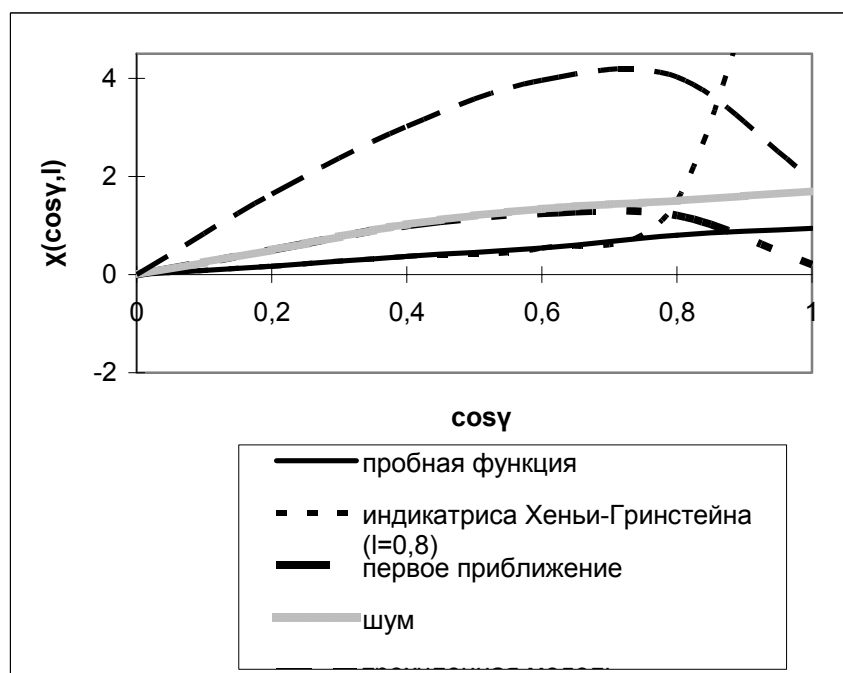


Рис. 12. Трехчленная аппроксимация атмосферной индикатрисы рассеяния $\chi(\cos \gamma)$, индикатриса рассеяния Хеньи-Гринштейна (28) и пробная функция F_0 в качестве входной функции при регуляризации.

Выходным параметром является оптимально оцениваемая функция аппроксимации индикатрисы рассеяния $\chi(\cos \gamma)$, восстановленная в два этапа: 1) обращение оператора модельного осреднения с оптимизацией по параметру регуляризации, 2) оценка среднеквадратичного отклонения (невязки) моделируемой аппроксимации и индикатрисы Хеньи-Гринштейна (28). На рис. 13 показаны кривые соответствующего регуляризованного решения — выходные функции аппроксимации индикатрисы рассеяния $\chi(\cos \gamma)$ и обращения оператора модельного осреднения.

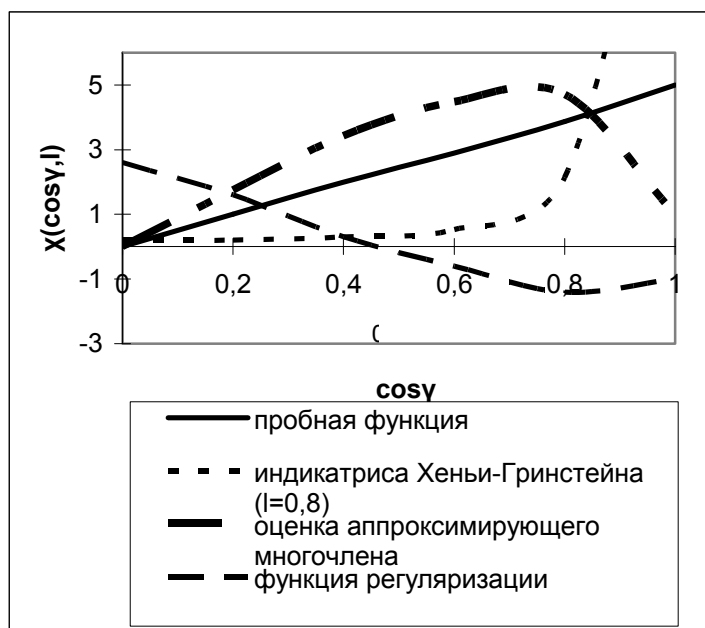


Рис. 13. Регуляризованные оценки атмосферной индикатрисы рассеяния $\chi(\cos \gamma)$ — выходные функций аппроксимации и обращения оператора модельного осреднения.

На рис. 14 изображен спектр регуляризации — зависимость среднеквадратичного отклонения (невязки) от параметра регуляризации (множитель Лагранжа $\tilde{\lambda}$), в минимуме которого ищется необходимая оптимальная аппроксимация атмосферной индикатрисы рассеяния $\chi(\cos \gamma)$.



Рис. 14. Спектр регуляризации оптимизируемого функционала невязки — поиск его минимума по параметру регуляризации.

В результате проведенных процедур оптимизации определяется функция плотности наиболее информативных точек (углов) измерения, в которых оцениваются базисные вектора функции отклика, параметры которой подлежат оценке по этим точкам, т.е. при сжатии оптимизируемой информации.

8. Выбор оптимального числа параметров и уровня дискретности измерений на основе информативности модельных данных

Выбор оптимального числа параметров имитационной модели и уровня ее дискретизации при заданном уровне ошибок измерений представляет большой интерес для решения проблемы сжатия большого количества информации при дистанционном зондировании природной среды из космоса.

На рис. 15 иллюстрируются гистограмма информативности модельной атмосферной индикатрисы рассеяния $\chi(\cos \gamma)$, построенные согласно формуле

$J = -\ln[\det \mathbf{D}]$, где \mathbf{D} — дисперсионная матрица оценок, обратная матрице Фишера M , вычислялась в зависимости от линейных комбинаций полиномов Лежандра $P_n(\cos \gamma)$ для трех- и четырехчленной индикатрис, шести и десяти точек дискретности согласно аэрозольной модели Элтермана [27]. Численное моделирование по шести точкам дискретности проводилось для трехчленных индикатрис вида:

- 1) $\chi(\cos \gamma) = 1 + x_3 P_3(\cos \gamma) + x_4 P_4(\cos \gamma)$;
- 2) $\chi(\cos \gamma) = 1 + x_1 P_1(\cos \gamma) + x_2 P_2(\cos \gamma)$;
- 3) $\chi(\cos \gamma) = 1 + x_2 P_2(\cos \gamma) + x_4 P_4(\cos \gamma)$;
- 4) $\chi(\cos \gamma) = 1 + x_1 P_1(\cos \gamma) + x_4 P_4(\cos \gamma)$;
- 5) $\chi(\cos \gamma) = 1 + x_1 P_1(\cos \gamma) + x_4 P_4(\cos \gamma)$;
- 6) $\chi(\cos \gamma) = 1 + x_1 P_1(\cos \gamma) + x_5 P_5(\cos \gamma)$.

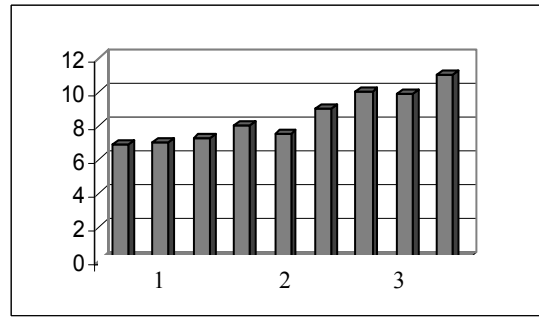
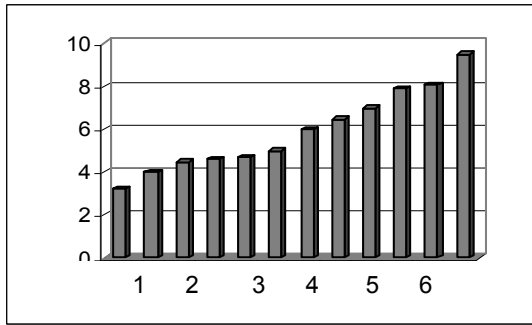
Численное моделирование по 10 точкам дискретности проводилось для четырехчленных индикатрис вида:

- 1) $\chi(\cos \gamma) = 1 + x_2 P_2(\cos \gamma) + x_3 P_3(\cos \gamma) + x_4 P_4(\cos \gamma)$,
- 2) $\chi(\cos \gamma) = 1 + x_2 P_2(\cos \gamma) + x_5 P_5(\cos \gamma) + x_6 P_6(\cos \gamma)$,
- 3) $\chi(\cos \gamma) = 1 + x_2 P_2(\cos \gamma) + x_4 P_4(\cos \gamma) + x_6 P_6(\cos \gamma)$.

Число измерений N выбиралось согласно оптимальному соотношению с количеством оцениваемых параметров n регрессионной модели.

На рис. 16 иллюстрируется зависимость информативности имитационной модели от числа ее параметров n и количества измерений (дискретности) N .

Заметим, что согласно известной теореме Котельникова-Найквиста желаемый уровень дискретизации (число измерений) N не может быть произвольным по отношению к общему числу параметров имитационной модели. Именно в соответствии с этой теоремой $N \geq 2n$. Согласно [28] при ошибках моделирования или погрешностях измерений полей излучения системы «атмосфера – подстилающая поверхность», не превосходящих уровня $\varepsilon \sim 10^{-4}$, оптимальная корреляция между величинами N и n равна $N \cong 2n + 30$ для первичного рассеяния света в атмосфере и однократного отражения фотонов от подстилающей поверхности.



а

б

Рис. 15. Информативность модельных атмосферных индикатрис рассеяния $\chi(\cos \gamma)$ от линейных комбинаций полиномов Лежандра $P_n(\cos \gamma)$ для разных уровней дискретизации измерений (аэрозольная модель Элтермана).

а — 4-х членная индикатриса рассеяния, вычисления по 10 точкам, б — 3-х членная индикатриса рассеяния, вычисления по 6 точкам.

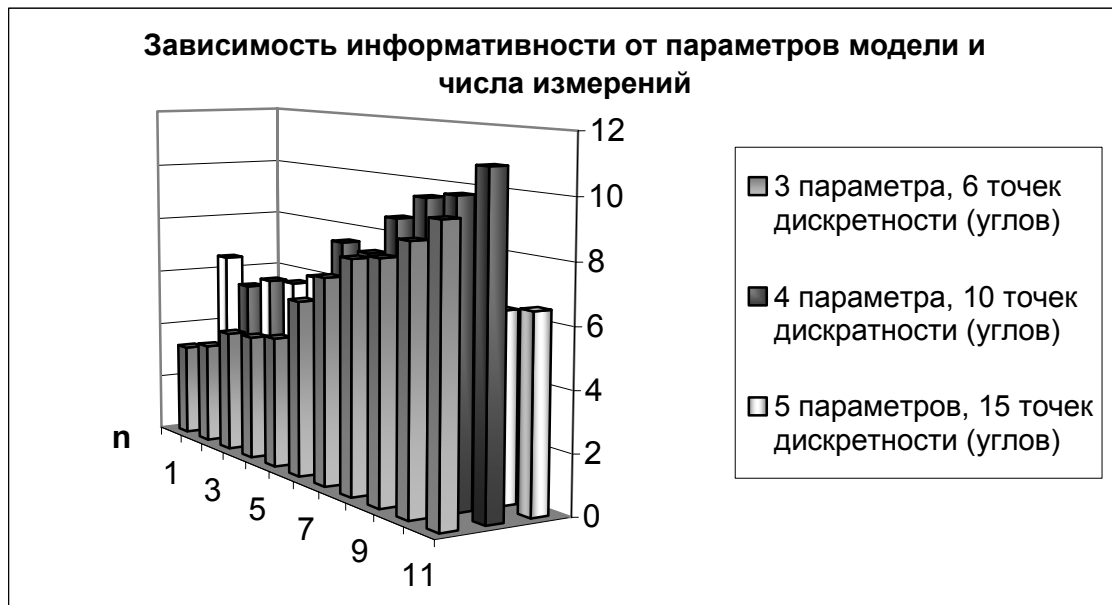


Рис. 16. Зависимость информативности атмосферной индикатрисы рассеяния от числа параметров ее имитационной модели и дискретности ее угловых измерений.

На рис. 17 представлена зависимость между оптимальным числом измерений (дискретности) N и общим числом оцениваемых параметров имитационной модели n при погрешности измерения $\varepsilon \sim 10^{-4}$.

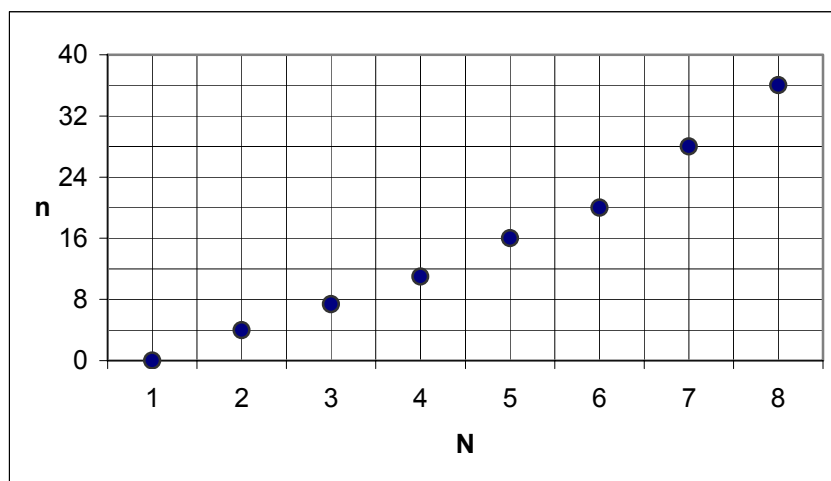


Рис. 17. Зависимость между оптимальным числом измерений N и степенью полинома регрессии, определяющего общее число оцениваемых параметров n (коэффициентов разложения атмосферной индикатрисы рассеяния по полиномам Лежандра P_n), при погрешности моделирования $\varepsilon \sim 10^{-4}$.

Согласно рис. 17 для фиксированной погрешности имитационной модели атмосферной индикатрисы рассеяния $\chi(\cos \gamma)$ чем больше общее число членов ее разложения в регрессионный ряд по полиномам Лежандра $P_n(\cos \gamma)$, тем выше должен быть уровень ее дискретизации по углу рассеяния γ .

9. Информационные параметры атмосферного фильтра

Рассмотрим теперь базовые информационные параметры атмосферного оптического канала, которые определяются дискретностью имитационной модели и ошибками измерения (моделирования) в выбранных точках отсчетов. При заданной модели переноса скалярного (без учета поляризации) излучения $I(\hat{X}, a)$, идущего от подстилающей поверхности, информационная емкость J оптического канала определяется согласно формуле [29]

$$J = Nk \frac{\ln(I_{\max} - I_{\min})}{\sigma}, \quad N = \frac{(\hat{X}_{\max} - \hat{X}_{\min})}{\Delta}, \quad k = (\ln 2)^{-1} = 1,44, \quad (32)$$

$$I(\hat{X}, a) = \sum_{i=1}^N a_i P_i, \quad n = \begin{bmatrix} -1/2 + 1/2(-7 + 8n)N^{1/2} \\ -1/2 - 1/2(-7 + 8n)N^{1/2} \end{bmatrix},$$

где $(I_{\max} - I_{\min})$ — динамический диапазон измеряемых спектральных яркостей, σ — погрешность (точность) измерения, N — число точек измерения (отсчетов), $(\hat{X}_{\max} - \hat{X}_{\min})$ — область изменения контролируемой переменной (углов, координат пространства, длин волн) *определяется минимальной частотой представления*, Δ — разрешение (шаг дискретизации независимых переменных в пространстве $X(x, y, z, \eta, \xi, \varphi, \tau)$) *определяется максимальной частотой*

представления), n — число параметров имитационной модели, a_i — параметры имитационной модели, P_i — полиномы Лежандра.

Статистическая независимость отсчетов проявляется на расстоянии $s_{кр}$, для которого предельная величина $s_{кр} \leq s$ является радиусом корреляции

$$s_{кр} = \lim_{k(s) \rightarrow 0} s(\hat{X}, a), \quad k(s) = \int_0^{\infty} J(\hat{X}, a) J(\hat{X} + s', a) ds'. \quad (33)$$

Условия совпадения этой величины с величиной максимального шага дискретизации Δ_{max} согласно упомянутой выше теореме Котельникова–Найквиста являются предметом специального исследования для каждой конкретной задачи. Однако очевидно, что если есть более точное представление, чем статистическая модель, то шаг дискретизации для определения информативности (информационного содержания) имитационной модели можно уменьшить до $\Delta_i < l_{кр}$. Таким образом, потеря информации в атмосферном оптическом канале в этом случае возникает за счет неточности самой модели. Сравнивая информацию, получаемую последовательными шагами при возрастании точности модели, получаем увеличение количества информации согласно выражению

$$\begin{aligned} \delta J = J_2 - J_1 = k \ln \left(\frac{I_{max} - I_{min}}{\sigma_1} \right)^{\frac{(\hat{X}_{max} - \hat{X}_{min})}{\Delta_1}} - \\ - k \ln \left(\frac{I_{max} - I_{min}}{\sigma_2} \right)^{\frac{(\hat{X}_{max} - \hat{X}_{min})}{\Delta_2}}. \end{aligned} \quad (34)$$

При изменении только шага отсчетов (числа точек измерения) увеличение количества информации δJ равно

$$\delta J = J_2 - J_1 = \left(\frac{1}{\Delta_1} - \frac{1}{\Delta_2} \right) k (\hat{X}_{max} - \hat{X}_{min}) \ln \left(\frac{I_{max} - I_{min}}{\sigma} \right). \quad (35)$$

Если ошибка σ (точность измерения оптической характеристики) связана с ошибкой отсчетов $\sigma = \sigma(\Delta)$ и $\hat{X}_{min} = 0$, то справедливо выражение

$$\begin{aligned} \delta J = k \frac{\hat{X}_{max}}{\Delta_1} \left(\frac{I_{max} - I_{min}}{\sigma(\Delta)\Delta_1} \right) - k \frac{\hat{X}_{max}}{\Delta_2} \left(\frac{I_{max} - I_{min}}{\sigma(\Delta)\Delta_2} \right) = \\ = k \hat{X}_{max} \left[\left(\frac{1}{\Delta_1} - \frac{1}{\Delta_2} \right) \ln \sigma' \Delta + \left(\frac{1}{\Delta_1} - \frac{1}{\Delta_2} \right) \ln(I_{max} - I_{min}) + \right. \\ \left. + \left(\frac{1}{\Delta_2} \right) \ln \Delta_2 - \left(\frac{1}{\Delta_1} \right) \ln \Delta_1 \right]. \end{aligned} \quad (36)$$

Если шаг дискретизации Δ_1 увеличить в целое число раз $\Delta_2 = L\Delta_1$, то увеличение количества информации δJ будет равно

$$\delta J = k \hat{X}_{max} \left[\left(\frac{L-1}{\Delta_1} \right) \ln \sigma \Delta - \left(\frac{L-1}{\Delta_1} \right) \ln(I_{max} - I_{min}) + \right. \\ \left. + \left(\frac{1}{\Delta_1} \right) \left(L \frac{\ln \Delta_1}{L} - \ln \Delta_1 \right) \right], \quad (37)$$

$$\frac{L \ln \Delta_1}{L} - \ln \Delta_1 = L \ln \Delta_1 - \ln \Delta_1 - L \ln L = (L-1) \ln \Delta_1 - L \ln L \dots \quad (38)$$

Из формул (37)–(38) следуют соотношения

$$\begin{aligned} \delta J &= k \frac{\hat{X}_{\max}}{\Delta_1} (L-1) \left[\ln(\sigma \Delta) - \ln(I_{\max} - I_{\min}) + \ln \Delta_1 - \frac{L}{L-1} \ln L \right] = \\ &= k \frac{\hat{X}_{\max}}{\Delta_1} (L-1) \left[\ln \left(\frac{\sigma(\Delta) \Delta_1}{I_{\max} - I_{\min}} \right) - \frac{L}{L-1} \ln L \right] \end{aligned} \quad (39)$$

Окончательно из (39) получаем для прироста количества информации δJ следующее выражение:

$$\delta J = k \frac{\hat{X}_{\max}}{\Delta_1} (L-1) \left[\ln \left(\hat{P} \frac{\sigma(\Delta) \Delta_1}{I_{\max} - I_{\min}} \right) \right], \quad (40)$$

где $\hat{P} = L^{-\left(\frac{L}{L-1}\right)}$, $L = 1, 2, \dots, N$. Дифференцируя (40) по параметру L и приравняв результат дифференцирования к нулю, получаем оптимальную кратность увеличения шага дискретизации Δ , при котором увеличение количества информации δJ максимально

$$\frac{d}{dL} \left[-k \frac{\hat{X}_{\max}}{\Delta_1} L \ln \frac{\hat{P} \sigma(\Delta) \Delta_1}{I_{\max} - I_{\min}} \right] = 0. \quad (41)$$

Таким образом, для оптимального увеличения информативности (информационного содержания) оптического атмосферного канала необходимо выбрать уровень дискретизации, согласованный с моделируемой зависимостью уровня ошибок от частоты (дискретности) измерений. Очевидно также, что с развитием возможностей космических навигационных технологий приобретает новое качество взаимодействие между имитацией оптимальных планов и динамическим подспутниковым эталонированием, необходимым для дистанционных измерений в рамках поиска не только наиболее информативных условий съемки (углов, высот, интервалов длин волн, параметров освещения), но и наиболее информативного распределения тест-участков с критическим состоянием прогнозируемого экологического или техногенного процесса. Как уже отмечалось выше, в таком многоцелевом (как минимум двухцелевом) представлении важен выбор критерия оптимального планирования аэрокосмической съемки. Так, например, для оптимального позиционирования при распределении тест-участков или маршрутов съемки с учетом критического состояния имитируемого процесса наиболее приемлем MV-критерий оптимальности, который позволяет проводить анализ распределения дисперсий оценок по всей области измерений. В то же время критерий D-оптимальности ограничивается анализом выбранной совокупности измерений и может быть использован для выбора оптимальных распределений плотности в заданных точках (условиях) съемки, например, для информативных углов измерений яркости при восстановлении атмосферной индикатрисы рассеяния. При поиске оптимальных планов в рамках решения общей оптимизационной задачи с использованием известного принципа максимума энтропии может использоваться один из упомянутых выше оптимизационных критериев. В качестве оптимизируемого функционала как правило выбирается среднеквадратичное отклонение (невязка) имитационного решения исходной краевой задачи (18)–(19) от аппроксимирующих функций, являющихся, по сути, искомыми оптимальными функциями управления. Чувств-

вительность невязки, определяющей точность используемых аппроксимаций, при заданных ограничениях может быть выражена с помощью выбора соответствующих множителей Лагранжа $\tilde{\lambda}$. С другой стороны, устойчивость ограничений, заданных исходным уравнением переноса излучения (18) и граничными условиями (19), для оптимизируемой задачи зависит от характерных собственных значений линейного оператора \hat{L} в (18). Таким образом, выбирая с помощью аппроксимирующих весовых коэффициентов искомую линейную комбинацию множителей Лагранжа $\tilde{\lambda}$ и используя собственные значения оператора \hat{L} , мы можем определить оптимальную функцию управления требуемого свойства, например, по точности аппроксимации или устойчивости системы. При такой постановке оптимизационной задачи оптимальные измерения или имитационное моделирование вертикального профиля яркости (по оптической глубине τ) системы «атмосфера – подстилающая поверхность» в соответствии с упомянутым выше принципом максимума энтропии должны проводиться в соответствии с ограничением

$$\max_{f(\tau)} J = \int_0^{\tau_0} \left\{ \hat{L}[(\tau, \eta, \xi, \varphi, \tau_0, A), I(\tau, \eta, \xi, \varphi, \tau_0, A), a] + \tilde{\lambda} \left[\hat{T} \left(I, \frac{\partial I}{\partial \tau}, f, A, a \right) \right] \right\} d\tau \quad (42)$$

при выполнении следующего условия экстремума:

$$\frac{\partial \hat{H}}{\partial I} = 0, \quad \hat{H} = \hat{L}[f, I, A, a] + \tilde{\lambda} \left[\frac{\hat{L}(I, \chi, a)}{\eta} \right], \quad (43)$$

где \hat{H} — оператор Гамильтона, \hat{L} — оператор Лагранжа, a — множество оптических параметров атмосферы, \hat{T} — имитационный модельный оператор. Функция управления (аппроксимации) может быть представлена в операторе Лагранжа \hat{L} в виде квадратичной формы $f^T D f$. При этом функция управления $f(\tau, \eta, \xi, \varphi, \tau_0, A, a)$ ищется в смысле точности аппроксимации по квадратичной метрике интенсивности поля излучения $I(\tau, \eta, \xi, \varphi, \tau_0, A, a)$, которая должна удовлетворять исходному уравнению переноса (18) и граничным условиям (19). Искомое решение f оптимальной аппроксимации получается из линейной системы соответствующих дифференциальных уравнений при выполнении условий экстремума для сопряженной относительно (42) задачи. Выбор дисперсионной матрицы оценок D определяет выбор оптимизируемого функционала. Если использовать также обратную матрицу $M = D^{-1}$, то имеем другую квадратичную форму $f^T M^{-1} f$, аналогичную используемой в задачах оптимального планирования и экстраполяции по MV-критерию оптимальности.

10. Заключение

Проведенные выше исследования показали в рамках объединенных понятий информативности, информационной калибровки и оптимального планирования аэрокосмической съемки необходимость их совместного использования для имитационного моделирования полей излучения системы «атмосфера – подстилающая поверхность», решения обратных задач дистанционного зондирования природных экосистем и построения эффективных моделей контроля за параметрами их состояния.

Основные выводы данной работы можно сформулировать следующим образом:

1. Оптимальные режимы аэрокосмической съемки (коэффициенты усиления чувствительности спектральных оптических каналов) можно контролировать в интерактивном режиме по экспресс-анализу сцен, используя качественные оценки по соответствию получаемых изображений естественным колориметрическим характеристикам типичных спектральных классов деградации и критическим состояниям природных экосистем.

2. Имитационное моделирование с использованием известных критериев информативности при наличии априорных данных о характерных распределениях спектральных оптических контрастов яркостей позволяет на примерах деградирующих участков прибрежной морской зоны рассчитать стратегию оптимального координатного (трассового) позиционирования аэрокосмической сканерной съемки природной среды для каждого последующего этапа процесса деградации экосистемы в зонах экологической напряженности.

3. Процесс деградации природных экосистем и соответствующая имитационная процедура поиска угнетенных экологических зон в общем виде описывается нелинейным уравнением диффузии, решением которого является функция распределения радиационного баланса или спектральных контрастов яркости исследуемой территории. В случае сканирования больших территорий для контроля сложных экосистем, разнопериодичных или экстремально-динамичных природных процессов, а также других иерархических и экстремально-динамических инфраструктур с распределенными параметрами использование этой стратегии наиболее перспективно.

4. При моделировании адекватных дистанционно измеряемых характеристик экологических процессов для прогноза наиболее информативных направлений их развития необходим выбор величин, инвариантных относительно параметров съемки и учитывающих особенности осциллирующего затухания высотного хода контрастов яркостей природной среды. Флуктуирующая составляющая важна в расчетах информативности спектрального зондирования экосистем при учете механизмов перераспределения пространственных частот и других параметров динамических процессов. При этом информативность дисперсий может быть выше, чем информационное содержание усредненных по пространству и времени величин, а низкочастотные и высокочастотные компоненты полей излучения характеризуют разные стороны процесса деградации экосистем. Особенно это относится к наиболее информативным областям их экстремальных состояний в зоне развития процесса деградации, например, при контроле точек перегиба спектральных и пространственных контрастов яркостей участков с критическим состоянием параметров рельефа, влажности, физико-химических и минералогических характеристик.

5. Оценка информационного содержания (информативности) аэрокосмической съемки Земли неразрывно связана с использованием единой информационной метрики и оптимизацией параметров спектрального атмосферного канала (фильтра).

6. Для каждого интервала длин волн увеличение информативности спектрального атмосферного канала достигается выбором оптимального числа уровней дискретизации, согласованных с уровнем ошибок измерений или погрешностью имитационного моделирования.

7. При дистанционном зондировании природной среды из космоса выделение оптимальных диапазонов информативности при трансформации аэро-

зольной земной атмосферой спектральных оптических характеристик экосистемы повышает общую информативность оценок спектров ее деградации и количественных параметров ее состояния.

Литература

1. *Бондур В. Г., Савин А. И.* Научные основы создания и диверсификации глобальных аэрокосмических систем // *Технология создания и диверсификации аэрокосмических систем.* М.: Наука. 2000. С. 496.
2. *Бондур В. Г., Савин А. И.* Концепция создания системы мониторинга окружающей среды в экологических и природно-ресурсных целях // *Исследование Земли из космоса.* 1992. №6. С. 70–78.
3. *Крапивин В. Ф., Кондратьев К. Я.* Глобальные изменения окружающей среды // *Экоинформатика.* СПб.: Наука. 2002. С. 724.
4. *Смоктый О. И.* Теория переноса излучения и проблемы космической геоинформатики // *Труды СПИИРАН.* 2002. Вып. 1. Т. 2. СПб.: Наука. С. 223–240.
5. *Смоктый О. И., Гусейнов Г. А.* Информативность и оптимальные планы дистанционного спектрофотометрирования зеленой поверхности. Л.: ЛИИАН. 1993. Препринт №157. 73 с.
6. *Гусейнов Г. А., Смоктый О. И.* Информационные свойства спектральных коэффициентов и вегетационных индексов для калибровки аэрокосмических снимков // *Труды СПИИРАН.* 2005. Вып. 2. Т. 2. СПб.: Наука. С. 360–367.
7. *Смоктый О. И., Гусейнов Г. А.* Информационные инварианты и калибровка спектрального зондирования природной среды из космоса // *Труды VIII Междун. Конференции «РИ-2002».* СПб.: Наука. 2002. С. 387–394 с.
8. *Кондратьев К. Я., Смоктый О. И., Козодеров В. В.* Влияние атмосферы на исследование природных ресурсов из космоса / Под ред. Марчука Г. И. М.: Машиностроение. 1985. 272 с.
9. *Kondratyev K. Ya., Kosoderov V. V., Smokty O. I.* Remote Sensing of The Earth from Space: Atmospheric Correction. Heidelberg: Springer-Verlag. 1992. 478 p.
10. *Smokty O. I.* Applied Mathematical Problems of Multispectral Satellite Data Atmospheric Correction and Filtration // *Proc. The CEReS Inter. symp. on the atmospheric correction of satellite data and its application to global environment.* Chiba Univ. 1998. P. 143–150.
11. *Космическое земледование: информационно-математические основы / Под ред. Садовниченко В. А. М.: МГУ.* 1998. 571 с.
12. *Исимару А.* Распространение и рассеяние волн в случайно-неоднородных средах. Т. 2. М.: Мир. 1981. С. 317.
13. *Савиных В. П., Смоктый О. И., Гусейнов Г. А.* Информативность и оптимальное планирование оптического аэрокосмического мониторинга. М.: МИИГАиК. 1990. С. 19.
14. *Головкин В. А., Козодеров В. В.* Радиационный баланс Земли: новые приложения для изучения природных стихийных бедствий из космоса // *Исслед. Земли из космоса.* М.: Наука. 2000. № 1. С. 26–41.
15. *Хакен Г.* Информация и самоорганизация: макроскопический подход к сложным системам. М.: Мир 1991. 241 с.
16. *Козодеров В. В.* Информационно-динамические аспекты описания природных явлений по наблюдениям из космоса // *Исследование Земли из Космоса.* М.: Наука. 2001. № 5. С. 27–44.
17. *Дегтярев Г. М., Иванов-Ростовцев А. Г., Колотило Л. Г., Любченко О. А., Смоктый О. И.* Детерминизм процессов самоорганизации и авторезонансные явления в системах с распределенными параметрами. Л.: ЛИИАН. 1991. Препринт №136. 48 с.
18. *Пригожин И., Стенгерс И.* Время, хаос, квант. М.: Прогресс. 1994. 266 с.
19. *Букатова И. Л., Михайлов Ю. И., Шаров М.* Эвоинформатика: теория и практика эволюционного моделирования. М.: Наука. 1991. 205 с.
20. *Шифрин К. С.* Оптические методы изучения океанов и водоемов // *Дистанционное изучение океанов и внутренних водоемов.* М.: Наука. 1979. С. 9–15.
21. *Смоктый О. И.* Моделирование полей излучения в задачах космической спектрофотометрии. Л.: Наука. 1986. 348 с.
22. *Смоктый О. И., Фабриков В. А.* Методы теории систем и преобразований в оптике. Л.: Наука. 1989. 312 с.
23. *Исследования природной среды с пилотируемых орбитальных станций / Под ред. Кондратьева. Л.: Гидрометеиздат.* 1973. 282 с.

24. *Кондратьев К. Я., Григорьев Ал. А., Покровский О. М.* Информационное содержание данных космической индикации параметров среды. Л.: ЛГУ. 1975. 145 с.
25. *Соболев В. В.* Рассеяние света в атмосферах планет. М.: Наука. 1972. 336 с.
26. *King M. D.* Sensitivity of Constrained Linear Inversion to The Selection of The Lagrange Multiplier // Journ. of Atmos. Sciences. Vol. 39. 1982. P. 1356–1369.
27. *Успенский А. Б.* Обратные задачи математической физики – анализ и планирование экспериментов // Математические методы планирования эксперимента. Новосибирск: Наука. 1981. С. 199–242.
28. *Smokty O. I.* The Basic Informational Content Levels for Satellite Ecological Investigation. Proc. Intern. conf. on Informatics and Control (ICI@C'97). Vol. 3. St. Petersburg. 1997. P. 1137-1144.
29. *Cox I., Sheppard Y.* Information capacity and resolution in optical system // Journ. Opt. Soc. Amer. Vol. 3, no. 3. 1986. P. 1152–1163.