

Оптимальные планы и информативность в задачах экологического мониторинга

Г.А. Гусейнов¹, О.И. Смоктий²

¹*Институт Космических Исследований природных ресурсов, Баку
AZ 1118, Баку, ул. Р.Рустамова, 47/100
E-mail: galib@mail.ru*

²*Санкт-Петербургский Институт Информатики и Автоматизации
199178 Санкт-Петербург, 14-ая линия В.О., д. 39*

В работе рассматривается развитие концепций академика К.Я. Кондратьева по информативности и сопоставимости дистанционных данных об окружающей среде. Исследуются условия получения информационных метрик, инвариантных в пространстве изменчивости спектрально-радиационных образов экосистем. При построении таких метрик рассматриваются модели пространственно-временной изменчивости, включая модели динамики популяций и распространения загрязнений. Выделены характерные диапазоны оптимальной информативности атмосферно-аэрозольной трансформации оптических характеристик. Используется понятие информационного эталонирования подспутниковых измерений при имитации на базе функционалов информативности, инвариантных относительно преобразований параметров съемки. Формулируется понятие спектра деградации на основе выделения характерных состояний динамики (пространственной изменчивости) экосистемы с переходами при критических значениях параметров между определенным набором образов выраженных специфическими кривыми фазовых портретов. и соответствующих вполне определенным распределениям распознаваемых признаков (плотности популяций, уровня загрязнений, состояния атмосферы).

Введение

Систематизация дистанционных данных о природных образованиях, полученных в различных условиях съемки, является неотъемлемой задачей аэрокосмических исследований Земли и остается актуальной, начиная с первых работ 60-70-х годов по обработке и сжатию материалов многоканальной видеоинформации [1, 2]. Поиски приемлемой метрики сопоставления этой информации при некоторых оптимальных условиях съемки дали начало развитию интересных приложений решения обратных задач математической физики, теории оптимального эксперимента и теории информации. В числе первых отечественных исследований в этом направлении были работы академика К.Я. Кондратьева и его коллег по систематизации оптимальных параметров съемки и оценке информационного содержания дистанционного эксперимента для различных задач зондирования окружающей среды [1]. А в последующих его работах были введены эмпирические коэффициенты перехода (сопоставимости) от натуральных данных к лабораторным для конкретных почвенно-растительных образований, а также исследовано влияние условий съемки и облученности поверхности на коэффициенты перехода [3, 4]. Впоследствии исследования оптимальных условий дистанционного эксперимента проводились для разных задач, в т.ч.- классических обратных задач зондирования подстилающей поверхности и атмосферы [2, 5]. Сегодня предлагаются новые концептуальные подходы к оценке информативности дистанционного материала, связанные с современными синергетическими концепциями [6].

Между тем, существует необходимость в конкретных расчетах информативности дистанционных данных при заданных ограничениях условий дистанционного эксперимента, а также в синтезе метрик для каждого конкретного случая модели экосистемы и ее динамики (популяции, распространения). И важным результатом этих расчетов, очевидно, является возможность оценки информационного выигрыша (проигрыша) при введении дополнительных измерений или изменении их параметров. Для этих целей в работе приводятся конкретные примеры расчета информативности моделей индикатрисы рассеяния аэрозольной атмосферы в зависимости от числа ее параметров и количества планируемых дистанционных измерений. Приводится также пример рас-

чета информационной метрики для задачи распространения деградации почвенно-лесных образований в рамках популяционной модели.

Оптимальные планы и информативность угловых измерений в атмосфере

Общая постановка и решение задач планирования измерений пространственно-угловых распределений интенсивности излучения, отраженного поверхностью Земли и рассеянного атмосферой, заключается в оптимизации функционала построенного на базисных векторах функции отклика в виде оцениваемой (обычно полиномиальной) регрессии, представляющей решение уравнения переноса излучения.

Таким образом, решение уравнения переноса может быть выражено отрезками рядов, представляющие регрессию,

$$f(x) = \sum_n C_n \cdot P_n(x), \quad x = \cos(\gamma), \quad \gamma \in (0, 2\pi), \quad n = 0, 1, \dots$$

в частности, для атмосферных задач - рядами Фурье по полиномам Лежандра

$$P_n(x) = \frac{1}{n!} \cdot \frac{d^n}{dx^n} (x^2 - 1)^n, \quad x \in (-1, 1), \quad n = 0, 1, \dots$$

или в случае учета азимутальных гармоник используется представление согласно формуле сложения шаровых функций

$$P_n(x) = P_n(\eta) \cdot P_n(\xi) + 2 \cdot \sum_{m=1}^n \frac{(n-m)!}{(n+m)!} \cdot P_n^m(\eta) \cdot P_n^m(\xi) \cdot \cos(m \cdot \phi)$$

с присоединенными многочленами Лежандра

$$P_n^m(x) = (x^2 - 1)^{m/2} \cdot \frac{d^m}{dx^m} P_n(x), \quad x \in (-1, 1), \quad n = 0, 1, \dots \quad m = 0, 1$$

Спектр плана в точк $x_j^* \in (-1, 1), j = 1, 2, \dots, N$ или в углах (η, ξ, ϕ) ищется соглас-

но алгоритму $\{x_j^*\}^T = \underset{x}{\text{Arg sup}} D[P_n(x)]$, где $D[P_n]$ - функционал от многочлена Ле-

жандра, соответствующий в данном случае D - критерию оптимальности, т.е. определителю дисперсионной матрицы, оптимизируемой в точках оптимального плана. Очевидно, элементы матри-

цы Фишера $F = P \cdot P^T$ для этого случая строятся на базисных векторах регрессии, т.е. полиномах $P = P_i(x_j)$. В результате мы получаем оптимальные распределения углов регистрации

излучения $x_j^* \in (-1, 1)$, зависящие фактически только от степени полиномов Лежандра, представляющих базисные функции регрессии, но, как известно, не от значений ее оцениваемых параметров.

При поиске оптимальных точек спектра плана согласно критерию MV-оптимальности

$\max_x d(x, \lambda) = \lambda(x) P^T (P \cdot P^T)^{-1} P$ нам предоставляется возможность производить ана-

лиз информации о распределении дисперсии по всей области и на основе этого анализа учитывать априорную информацию с помощью вводимой функции эффективности плана $\lambda(x)$.

Требования введения функции эффективности плана, получаемой из априорной информации, оправданы, например, при необходимости более детальных измерений в определенных углах, где точность измерения невысока: высокая дисперсия из-за сильных осцилляций в точках обрезания ряда, резкие перепады индикатрисы рассеяния для конкретной модели атмосферы. Рассмотрим спектры плана при аппроксимации атмосферной индикатрисы рассеяния излучения полиномами Лежандра. Как известно оптимальное распределение точек плана для оценки параметров регрессии будет совпадать с распределением нулей полинома Лежандра соответственно старшей степени многочлена, представляющего регрессию. На рис. 1 кривые иллюстрируют распределения дисперсионной кривой информативности 3-х членной индикатрисы аэрозольного рассеяния атмосферы согласно MV-критерию оптимального плана по 6 измерениям для модели Эльтермана. Эти распределения можно рассматривать как исходные при решении задачи поиска наиболее информативных планов по оценке параметров 3-х членного приближения индикатрисы рассеяния аэрозольной атмосферы.

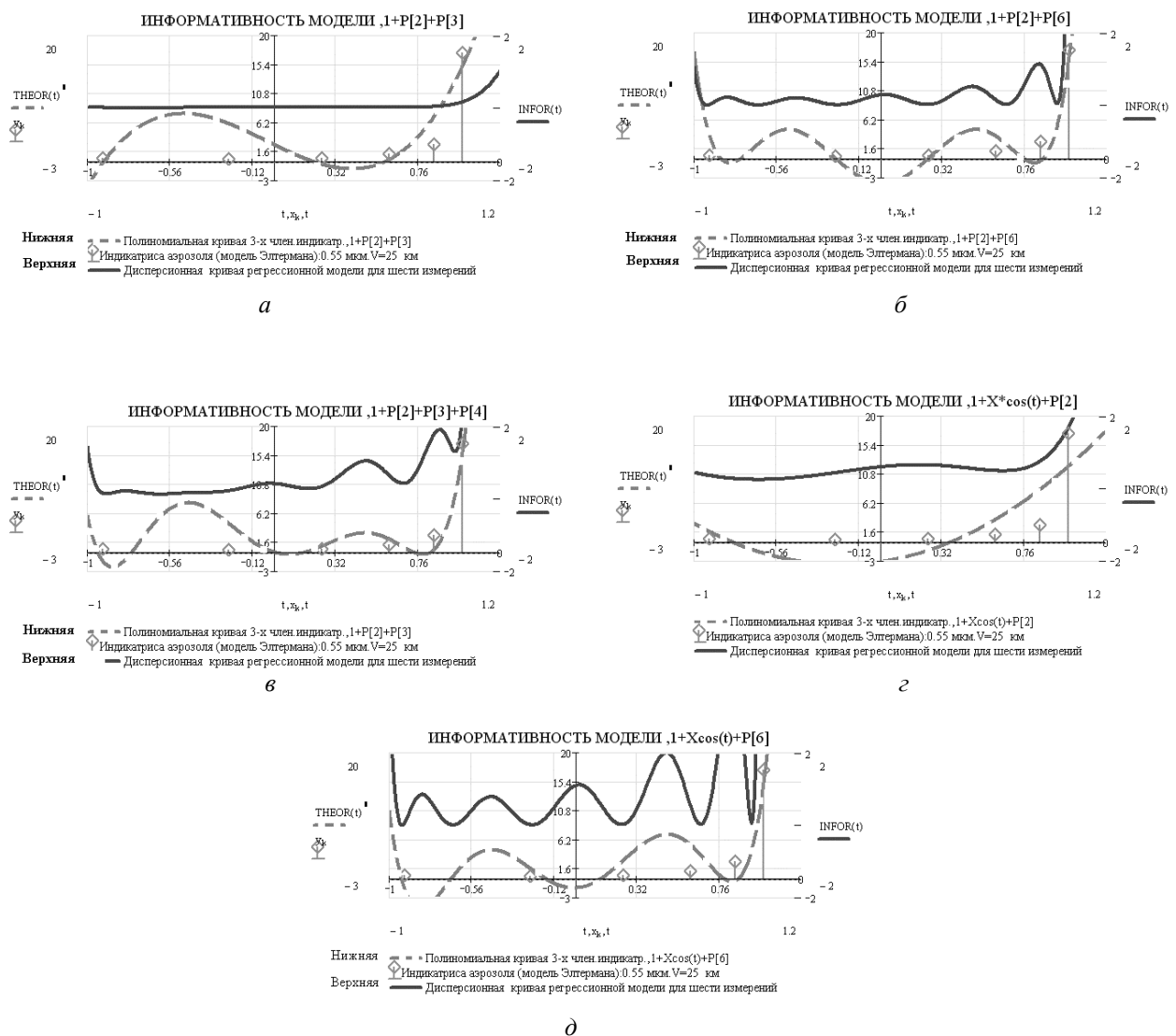


Рис. 1. Кривые распределения дисперсионной кривой информативности (синяя верхняя кривая) 3-х членной индикатрисы аэрозольного рассеяния атмосферы согласно MV-критерию оптимального плана по 6 измерениям для полиномов Лежандра разных степеней, соответствующих различным членам приближения регрессионного ряда (красная нижняя кривая). Надписанные значения относятся к комбинациям полиномов, представляющих регрессионную модель

На рис. 2 кривые иллюстрируют распределения дисперсионной кривой информативности 4-х членной индикатрисы аэрозольного рассеяния атмосферы по 10 измерениям для модели Эльтермана. Представленные распределения можно рассматривать как исходные при решении задачи поиска наиболее информативных планов по оценке параметров индикатрисы рассеяния аэрозольной атмосферы.

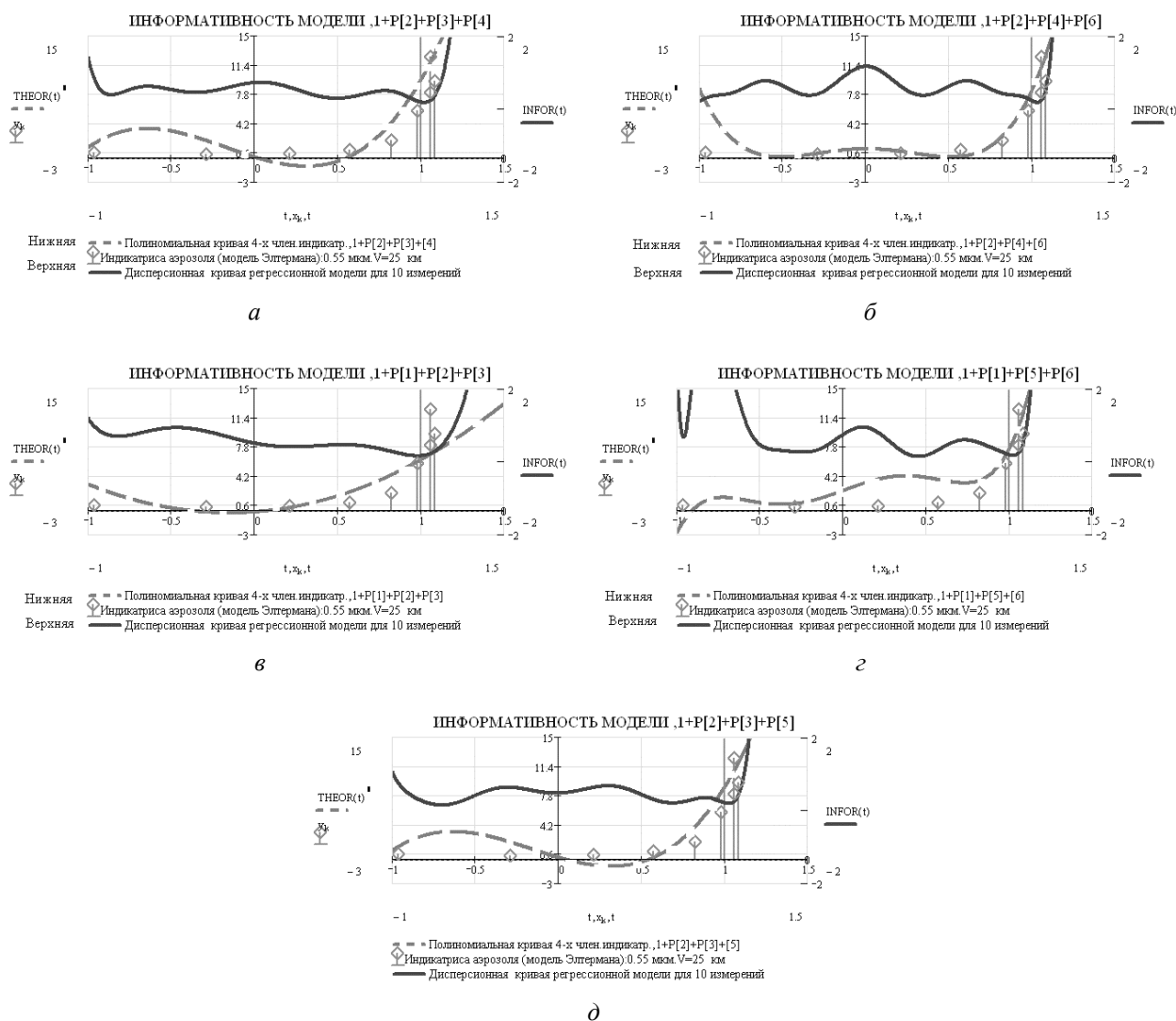


Рис. 2. Кривые распределения дисперсионной кривой информативности (синяя верхняя кривая) 4-х членной индикатрисы аэрозольного рассеяния атмосферы согласно MV-критерию оптимального плана по 10 измерениям для полиномов Лежандра разных степеней, соответствующих различным членам приближения регрессионного ряда (красная нижняя кривая). Надписанные значения относятся к комбинациям полиномов представляющих регрессионную модель

Информативность модели индикатрисы аэрозольной атмосферы

Задача параметризации индикатрисы и поиска оптимального плана распределения точек измерения (вычисления) решается как последовательные процедуры единого цикла. В качестве аппроксимируемой индикатрисы принимается модель Хеньи-Гринштейна.

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

где $l \in (0,1)$ - параметр вытянутости атмосферной индикатрисы рассеяния, $\cos(\gamma)$ - косинус угла рассеяния в сферических координатах.

Поиск наилучшей аппроксимации индикатрисы χ регрессионными рядами полиномов Лежандра в рамках регуляризации некорректной задачи формально реализуется посредством оптимизации функционала [5].

$$U = (\chi - \Lambda F)^T (\chi - \Lambda F) + \lambda \cdot (F - F_0)^T (F - F_0)$$

и приводит к решению линейной задачи $F(\lambda) = (\Lambda^T \Lambda + \lambda \cdot I)^{-1} (\Lambda \chi + F_0)$

для поиска оптимального значения параметра Лагранжа λ , минимизирующего ошибку аппроксимации $|\chi - \Lambda \cdot F(\lambda)|$, где χ - индикатриса Хеньи-Гринштейна, F - искомая функция индикатрисы, представленная регрессионным рядом полиномов Лежандра.

Λ - матрица преобразования (усреднения) аппроксимируется в нашем случае функцией Хевисайда $\Phi(x - a)$, F_0 - пробная функция.

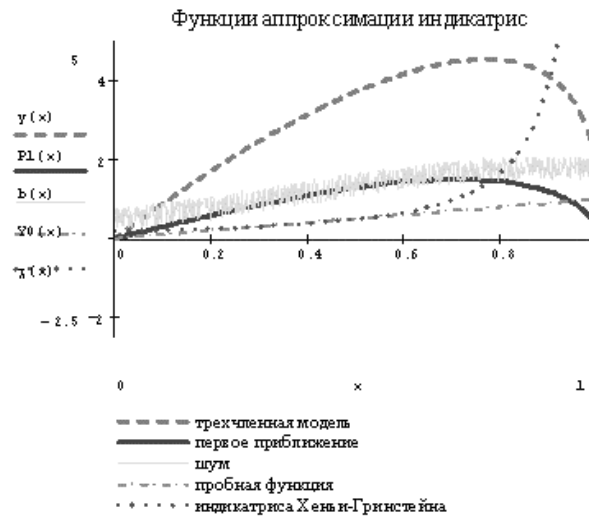


Рис. 3. Входные функции: трехчленная функция аппроксимации индикатрисы, а также индикатриса Хеньи-Гринштейна и пробная функция в качестве входного параметра при регуляризации

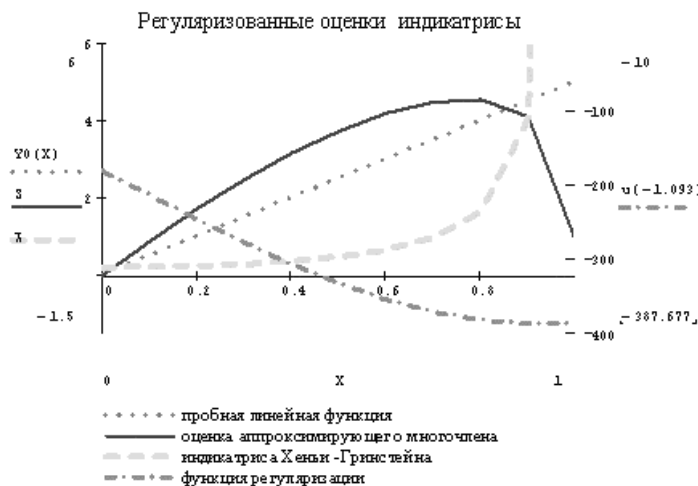


Рис. 4. Кривые регуляризованного решения – выходные функций аппроксимации и обращения

На рис. 3-4 показаны составляющие регрессию полиномы, в нулях которых определяются точки спектра плана аппроксимирующего многочлена полиномами Лежандра. В литературе в задачах по моделированию атмосферных параметров для получения приемлемых приближений решения уравнения переноса излучения в атмосфере используют трехчленную индикатрису, т.е. приближение отрезком 3 первых членов ряда Фурье по полиномам Лежандра [7]. На рис. 3 иллюстрируются трехчленная функция аппроксимации индикатрисы, а также индикатриса Хеньи-Гринштейна и пробная функция в качестве входного параметра при регуляризации. Выходным параметром является оптимально оцененная функция аппроксимации индикатрисы, восстановленная в два этапа: обращения оператора приборного осреднения с оптимизацией по параметру регуляризации расхождения моделируемой аппроксимации с индикатрисой Хеньи-Гринштейна. На рис. 4 показаны кривые регуляризованного решения - выходные функции аппроксимации и обращения. На рис. 5 демонстрируется так называемый спектр регуляризации невязки или - зависимость невязки от параметра регуляризации, которую мы получаем в результате решения линейного уравнения, используя рассмотренный выше оператор обращения, а затем - эту зависимость, собственно, для регуляризации посредством оптимизации по параметру Лагранжа. В результате 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. На рис. 6 иллюстрируются графики информативности согласно $I = -\ln(\det D)$ в зависимости от комбинации полиномов 3-ч и 4-членной индикатрисы атмосферного рассеяния для 6-ти и 10-ти точек измерения согласно модели Элтермана, где D - дисперсионная матрица, обратная матрице Фишера. Число измерений выбирается согласно оптимальному соотношению с количеством выбираемых оцениваемых параметров регрессионной модели [2]. На рис. 7 приведен график этого соотношения. На рис. 8 показаны результаты моделирования зависимости информативности от набора параметров модели индикатрисы и числа планируемых измерений (углов). Очевидно модель индикатрисы, представленная полиномами Лежандра, теряет информативность при 5-ти параметрах (членов ряда) и планируемых 15 измерениях по сравнению с 10-ти точечными планами для 4-ч параметрической модели. Планы по оценке 3-х параметрической модели соответственно в 6 точках также менее информативны, но информативнее 15-ти точечных планов для 5-ти параметрической модели.

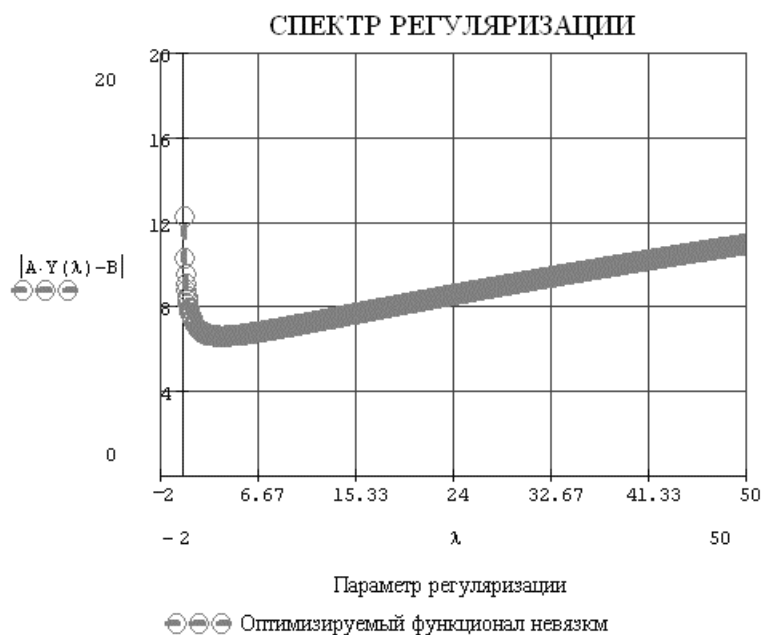


Рис. 5. Спектр регуляризации оптимизируемого функционала невязки – поиск его минимума по параметру регуляризации



Рис. 6. Зависимости информативности от комбинации полиномов 3-ч и 4-х-членной индикатрисы атмосферного рассеяния для 6-ти и 10-ти точек измерения согласно модели Элтермана

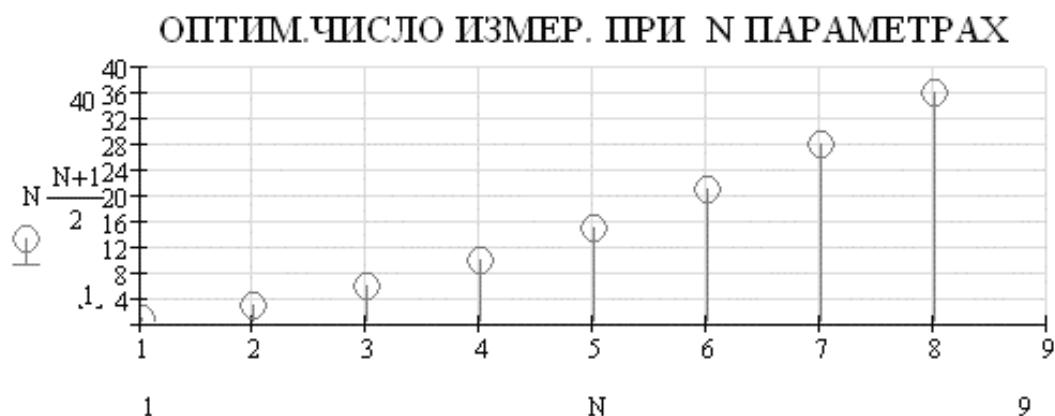


Рис. 7. Оптимальное соотношение числа измерений и степени полинома регрессии, определяющего число оцениваемых параметров (в нашем случае амплитуд разложения индикатрисы по полиномам Лежандра)

Зависимость информативности от параметров модели и числа измерений (углов)

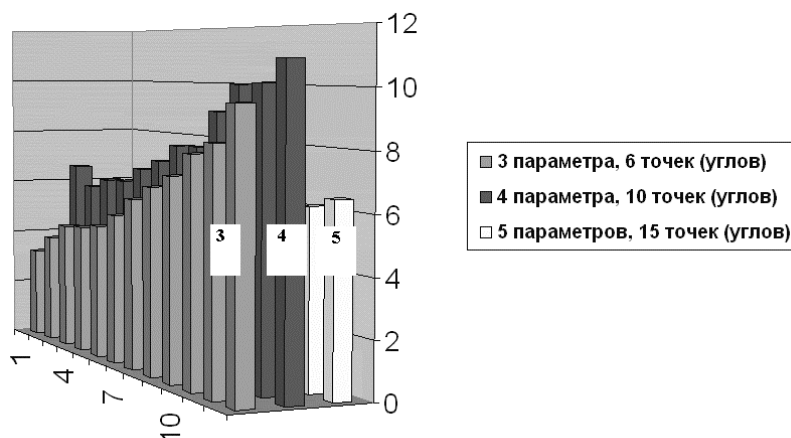


Рис. 8. Зависимость информативности от набора параметров модели индикатрисы и числа планируемых измерений (углов)

Метрики информационной калибровки дистанционных данных экологического мониторинга деградирующей лесной экосистемы

Анализ полей пространственных контрастов спектрально-оптических характеристик деградирующих экосистем дает основание моделировать их взаимосвязь с частотно-временными характеристиками многомасштабных процессов, формирующих ландшафт экосистемы [8]. За периоды деградации экосистема проходит значительный спектр различных масштабов пространственной изменчивости [9]. В этом смысле для реализации наиболее полных возможностей моделирования важно воспроизведение неоднородных условий деградации экосистемы на достаточно представительной по пространственным масштабам территории, охватывающей определенное разнообразие климатогеографических зон, ландшафтов, типов рельефа, метеоусловий. При этом расширяются условия наиболее полного наблюдения моделируемой экосистемы в смысле возможности прослеживания спектра деградации на разных стадиях, соответствующих различным масштабам пространственной изменчивости из информативного диапазона. Пример тому – процессы обезлесения (опустынивания), для идентификации различных стадий которого используются пространственные признаки распределения оптических контрастов и радиационного баланса, соответствующие информативным масштабам деградации [8]. Физика механизма пространственной изменчивости радиационного баланса в основе такого эффекта объясняет неустойчивость деградирующей экосистемы, переходящую в запороговую (необратимую) область, соответствующую критическим масштабам деградации [8, 10].

Ниже на рис. 9 показан эффект долговременной динамики метеопараметров лесной экосистемы в прибрежной зоне, как результат изменчивости, вызванной процессом обезлесения в качестве доминирующего фактора на фоне влияния других антропогенных и природных факторов. Прослеживается повышение среднегодовой температуры и понижение годовой нормы осадков (особенно за последние 10 лет), т.е. изменения климата в сторону более засушливого в этой лесной субтропической зоне на юго-западном побережье Каспия. Очевидно, немаловажным фактором этого процесса является уменьшение площадей лесных массивов в результате многолетних вырубок. Однако в наши задачи не входило исследование климатических изменений в зависимости от деградации лесных экосистем. Мы анализируем возможности использования динамических моделей экосистемы, включающих спектрально-радиационные характеристики, для поиска информативных областей параметров их состояния с целью выработки метрик калибровки дистанционных данных.

**Межгодовая динамика температуры воздуха
(1988-2002), Ленкорань**

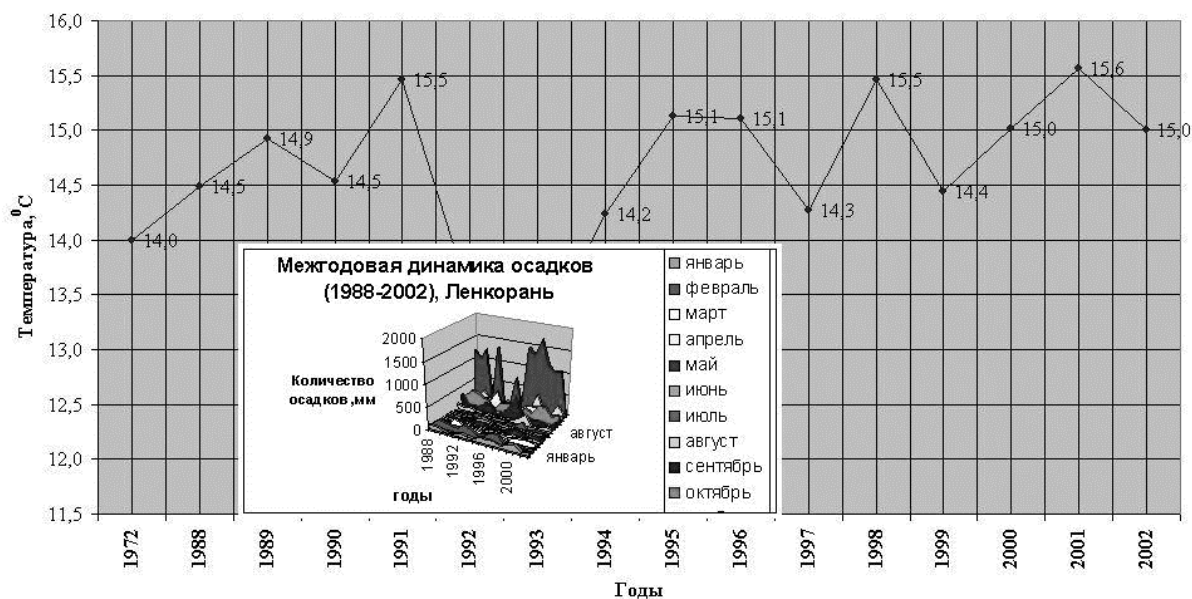


Рис. 9. Многолетняя динамика метеопараметров (температуры и осадков) в характерных областях обезлесения прибрежной субтропической экосистемы на юго-западном побережье Каспия:
а) - Ленкоранская зона; б) - Астаринская зона

Для расширения рассматриваемого диапазона динамических свойств экосистемы (общепринятых моделей динамики популяции) с анализом всех возможных состояний (бифуркаций, предельных циклов) мы включим в рассмотрение свойства самоорганизующихся диффузно-диссипативных структур, рассмотренных в работе [11, 12]:

$$\begin{aligned} \frac{dN(r,t)}{dt} &= F_1(N,R) + D_N \frac{\partial^2 N}{\partial r^2}, \\ \frac{dR(r,t)}{dt} &= F_2(N,R) + D_R \frac{\partial^2 R}{\partial r^2} \end{aligned} \quad (1)$$

где N - плотность популяции; R - плотность пространственного распределения оптических контрастов, формирующих на критических частотах динамику радиационного баланса экосистемы; D_N и D_R - коэффициенты диффузии (плотности популяции и контраста, соответственно); $r(x, y)$ - радиус-вектор в плоскости распространения деградации; $F_1 = A + N(B - N \cdot R) - C \cdot R$ - функция дрейфа плотности популяции; $F_2 = -L \cdot N + \frac{\partial R}{\partial r} + f_R(\omega_0)$ - функция дрейфа пространственно-оптических контрастов с флуктуирующей составляющей $f_R(\omega_0)$; ω_0 - минимальная частота долгопериодической составляющей флуктуаций; A, B, C, L - константы динамической системы. Диффузионные составляющие являются регулярными процессами выравнивания распределений биомассы и радиационного баланса в результате распространения горизонтальных потоков, определяемых неоднородностью. В отличие от консервативных колебательных систем типа маятника или модели популяции с нейтрально - устойчивым состоянием равновесия, когда любое нарушение меняет параметры устойчивости системы, здесь учитываются диффузионные составляющие, которые регулируют пространственное распределение компонент. Дополнительно учитываемые

нелинейные и диффузионные члены - новые механизмы пространственного взаимодействия, расширяющие спектр возможных состояний экосистемы и условия их реализации (устойчивости, неустойчивости).

Для исследования всех этих свойств экосистемы рассмотрим сначала несколько крайних случаев. Определим параметры системы и оценим характерные значения для этих крайних состояний. Затем определим, какие параметры несут основную информацию об экосистеме, чтоб на их основе построить информационную метрику [12]. Решение линеаризованной системы с экспонентой временной зависимости $\exp(\nu \cdot t)$ в стационарной области (N^*, R^*) динамической системы при ненулевых условиях стационарности и в приближении малости вклада диффузной составляющей (вблизи двух крайних точек пространственной однородности) имеет вид

$$\begin{pmatrix} N^* \\ R^* \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{f}{L} \\ L \cdot \frac{(A \cdot L + f \cdot B)}{(f^2 + C \cdot L^2)} \end{pmatrix} \quad (2)$$

Для определения условий устойчивости решения вблизи стационарных точек варьируются управляющие параметры системы, начальные условия и флуктуационная составляющая, меняя распределения плотности популяции и оптических контрастов, эволюция которых в некоторых масштабах определяет, в конечном счете, наблюдаемый дрейф метеопараметров. Пространственное распределение плотности популяции и контрастов можно выразить через собственные функции $N_n(r)$, $R_n(r)$ и собственные значения $-k_m^2$ операторов Лапласа: $\Delta N_m(r) = -D_N \cdot k_m^2 \cdot N_m(r)$, $\Delta R_m(r) = -D_R \cdot k_m^2 \cdot R_m(r)$, представляющих диффузионные процессы в деградирующей лесной экосистеме. И тогда характеристическое уравнение рассматриваемой системы имеет вид:

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

где $V = B - 2f \cdot \frac{A \cdot L + f \cdot B}{f^2 + C \cdot L^2}$ - кинетическая составляющая системы, а собственные значения

$$V_{1,2}^* = \frac{1}{2} \cdot \left(\begin{matrix} D_{R-N} k_m^2 + V + [(D_{R+N} k_m^2 - V)^2 + 2D_N \cdot D_R \cdot k_m^4 + 8f + 4 \cdot L \cdot C]^{1/2} \\ D_{R-N} k_m^2 + V - [(D_{R+N} k_m^2 - V)^2 + 2D_N \cdot D_R \cdot k_m^4 + 8f + 4 \cdot L \cdot C]^{1/2} \end{matrix} \right),$$

где $D_{R-N} k_m^2 = (D_R - D_N) \cdot k_m^2$; $D_{R+N} k_m^2 = (D_R + D_N) \cdot k_m^2$.

При следующей итерации в стационарных решениях (2), рассчитанных с диффузионной добавкой управляющие параметры преобразуются к виду

$$f \rightarrow f + k_m; \quad C \rightarrow C - D_R; \quad A \cdot L + f \cdot B \rightarrow A \cdot L + (f + k_m) \cdot B - (f + k_m) \cdot D_N$$

В отличие от случаев устойчивости ($\nu \leq 0$), и традиционной модели популяции с нейтральной устойчивостью ($\text{Re } \nu = 0$ и $\text{Im } \nu = \pm \frac{1}{2}(B^2 + 4 \cdot L \cdot C)^{1/2}$) с вращением вокруг стационарного состояния, мы имеем неустойчивую систему с предельным циклом. Неустойчивая мода V_m пространственно зависима в силу зависимости от собственного значения k_m . Таким образом, метрика, построенная на базе этой величины, потенциально несёт существенную информацию о пространственном распределении популяций и контрастов экосистем в результате эволюционно-диффузионных процессов.

Литература

1. Кондратьев К.Я., Григорьев Ал. А., Покровский О.М. Информационное содержание данных космической индикации параметров среды // Л.: ЛГУ, 1975. 145 с.
2. Успенский А.Б. Обратные задачи математической физики - анализ и планирование экспериментов // Сб. трудов: Математические методы планирования эксперимента // Новосибирск: Наука, 1981. С. 199-242.
3. Кондратьев К.Я., Федченко П.П. Дневной ход спектральной отражательной способности и почв // Исследование Земли из космоса, 1984. №4. С.40-48.
4. Кондратьев К.Я., Козодеров В.В., Федченко П.П. Аэрокосмические исследования почв и растительности // Л.: Гидрометеиздат, 1986. 230 с.
5. Исимару А. Распространение и рассеяние волн в случайно-неоднородных средах // М.: Мир, 1981. 317 с.
6. Козодеров В.В. Информационно-динамические аспекты описания природных явлений // Исследование Земли из космоса, 2001. № 5. С.27-43.
7. Смоктий О.И. Моделирование полей излучения в задачах космической спектрофотометрии // Л.: Наука, 1986. 348 с.
8. Виноградов Б.В. Аэрокосмический мониторинг экосистем // Л.: Наука, 1991.
9. Савиных В.П., Смоктий О.И., Гусейнов Г.А. Информативность и оптимальное планирование оптического аэрокосмического мониторинга Земли // М.: МИИГАиК, 1990. 19 с. - ДЕП. В ОНИПР ЦНИИГАиК 22.02.90, № 418-гд.90.
10. Головкин В.А., Козодеров В.В. Радиационный баланс: Новые применения к изучению стихийных бедствий // Исследование Земли из космоса, 2000. № 1. С.26-41.
11. Пригожин И. От существующего к возникающему // М.: Наука, 1985. 327 с.
12. Смоктий О.И., Гусейнов Г.А. Информационные инварианты и калибровка спектрального зондирования природной среды из космоса // Труды VIII СПб. Междун. Конференции «РИ-2002». С.387-394.
13. Гусейнов Г.А., Егоров В.В., Садыков Р.Х. Метрики информационной калибровки при трансформации спектрально-оптических образов экосистем // Исследование Земли из космоса, 2006. № 2. С.14-27.