

УДК 504.062, 519.833

## **КОМПЛЕКСНЫЙ ПОДХОД К АВТОМАТИЗАЦИИ ПРОЦЕССА ПРОГНОЗИРОВАНИЯ РАЗВИТИЯ АНТРОПОГЕННЫХ АНОМАЛИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЛОГИКО-АЛГЕБРАИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ**

*О.С. Бутенко, д-р. техн. наук, доцент  
(Национальный аэрокосмический университет  
им. Жуковского Н.Е., «ХАИ», г. Харьков);*

*Г.Я. Красовский, д-р. техн. наук, проф.,  
(Научно-производственный центр «ПРИРОДА»  
ГКА Украины, г. Киев);*

*О.М. Трофимчук, д-р. техн. наук, проф.,  
(Институт телекоммуникаций  
и глобального информационного  
пространства НАН Украины, г. Киев).*

*В отличие от существующих подходов к прогнозированию процессов развития антропогенных аномалий, предложена интеграция междисциплинарных методов комплексного анализа данных дешифрирования космических снимков и полевых наблюдений при прогнозировании процессов развития таких аномалий. Предложены методы последовательной реализации анализа и обработки разнородных и разновременных данных с минимальными временными и информационными затратами.*

*На відміну від існуючих підходів до прогнозування процесів розвитку антропогенних аномалій, запропонована інтеграція міждисциплінарних методів комплексного аналізу даних космічних знімків і польових спостережень при прогнозуванні процесів розвитку таких аномалій. Запропоновані методи послідовної реалізації аналізу та обробки різномірних даних з мінімальними часовими та інформаційними витратами.*

*Unlike existing approaches to forecasting processes of development-induced anomalies, offered integration interdisciplinary methods of integrated interpretation of space imagery and field observations and forecasting processes, the development of such anomalies. The outlined methods of successive analysis*

© О.С. Бутенко, Г.Я. Красовский, О.М. Трофимчук, 2011

*implementation and heterogeneous data handling required minimum time and information consumption.*

## **Введение**

Анализ последних событий, связанных с различными техногенными и экологическими катастрофами, показал, что предупреждение их возникновения возможно по результатам прогнозирования процессов развития антропогенных аномалий. Для анализа исследуемой местности, определения существенных факторов воздействия на аномалии и установления причинно-следственных связей их возникновения, привлекаются большие объёмы разнообразной информации. Методы дистанционного зондирования Земли позволяют получать данных об объектах и явлениях в широком диапазоне параметра пространственного разрешения. Для построения прогноза процессов, описываемых этими данными, необходимо привлечение результатов контактных наблюдений. Проведение таких наблюдений требует значительных материальных и временных затрат, что снижает оперативность построенного на их основе прогноза и принятия решений о предупреждении возможных негативных последствий развития антропогенных аномалий. При этом возникают сложности, связанные со своевременным обеспечением информационной поддержки совместного анализа этих данных и комплексированием имеющейся в наличии разновременной и разнородной информации. Известные программные средства проведения операций с разнородными данными требуют значительных информационных и временных ресурсов при увеличении погрешностей результатов за счет их обработки не в единой шкале. Задержка времени транзакций заказа и получения исходных данных снижает оперативность прогноза темпов и тенденций чрезвычайных ситуаций и выдачи на его основе рекомендаций для принятия решений о ликвидации их последствий.

В связи с этим, актуальной является разработка комплексных подходов к построению кратковременного прогноза развития антропогенных аномалий в условиях ограниченной априорной информации за счет унификации процесса

формирования геоинформационных моделей с описанием параметров их макро- и микродинамики.

### 1. Методы построения геомodelей для анализа процессов развития антропогенных аномалий по данным мониторинга экосистем

Для реализации комплексного подхода к прогнозированию динамики изменений различных антропогенных аномалий, весь процесс построения прогноза разделен на три основных направления — это обработка изображений и снятие топологических характеристик с локализованной аномалии, анализ и оценка её состояния и построение прогноза дальнейшего её распространения с оценкой возможности перехода в катастрофу (рис. 1).

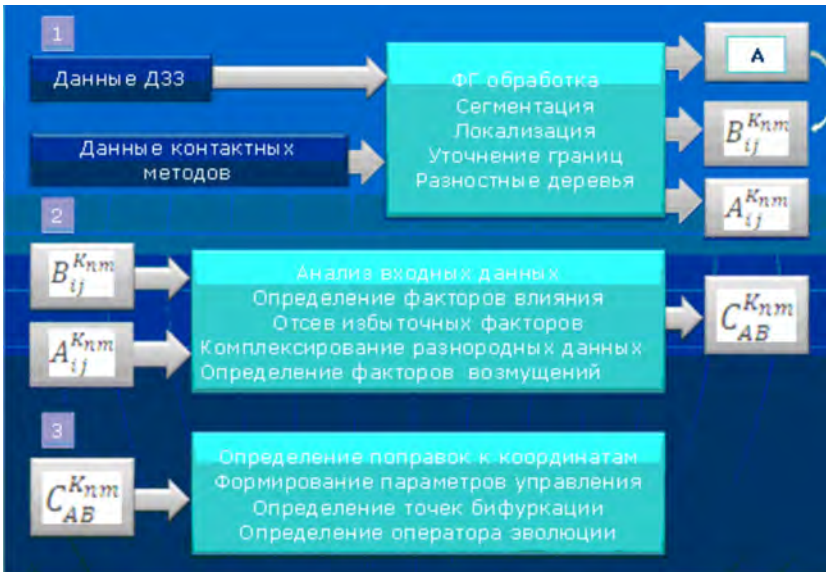


Рис. 1. Систематизация методов построения прогноза развития аномалий.

Как показано на рис. 1 для решения задач первого направления представлены методы обработки данных изображений, связанные с выявлением, локализацией и идентификацией различных аномалий, их фотограмметрической нормировкой и привязкой, задачи, связанные со снятием топологических характеристик с локализованной аномалии и выявлением различного рода изменений по результатам оверлейных операций [1].

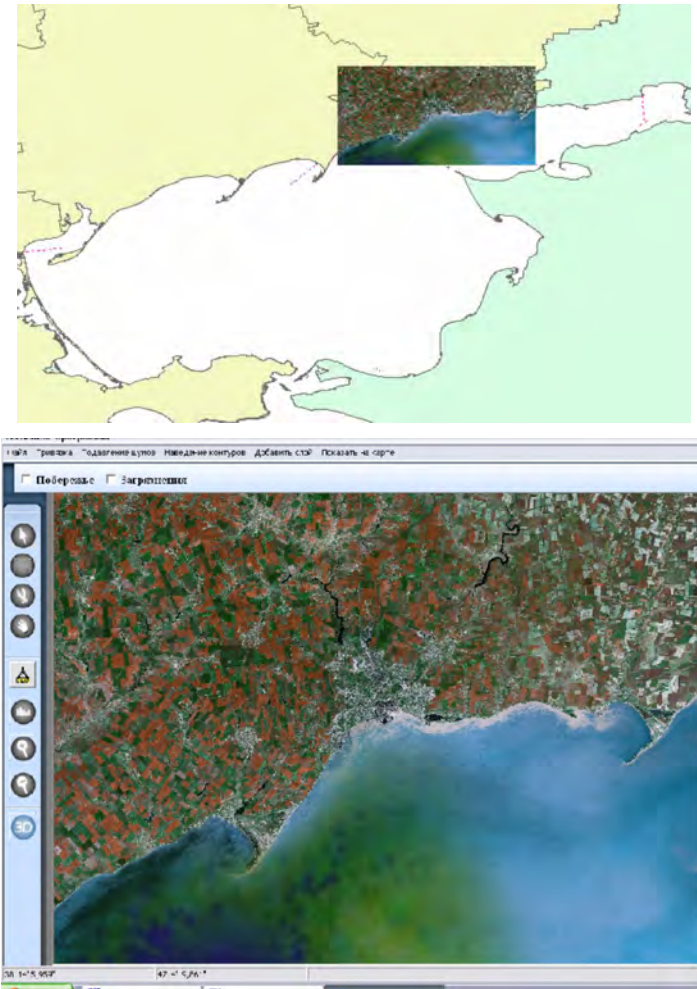
Поскольку при формировании вектора параметров при построении прогноза используются разновременные изображения, полученные различной съемочной аппаратурой, необходимым этапом является дополнительная фотограмметрическая обработка. Для преобразования изображений в вид, не зависящий от источника получения данных, проводится дополнительное аналитическое трансформирование исходного изображения в заданную картографическую проекцию [2], в ходе которого обеспечивается географическая привязка космических снимков с возможностью измерений расстояний между точками, углов между направлениями, периметров, площадей и т.п. На рис. 2 представлен результат программной реализации фотограмметрической нормировки.



*Рис. 2. Результат трансформирования снимка*

В отличие от известных методов задача географической привязки решается единым способом с дальнейшим переводом системы географических координат в прямоугольную и затем в экранную, что позволяет преобразовать совокупность изоб-

ражений из БД к единому виду, для проведения различных геометрических и оверлейных операций с одновременными фрагментами изображений. На рис. 3 представлен снимок, приведенный к прямоугольным координатам. Для сравнения он наложен на векторную карту.



*Рис. 3. Результат приведения снимка к прямоугольным координатам.*

В силу того, что аномалия занимает по сравнению с размерами земного эллипсоида незначительную территорию, для пересчета прямоугольных координат в географические и наоборот, предложено использование сокращенных формул вычислений в 2-градусной зоне. В этом случае вводится допущение о том, что Земля принимается за шар с радиусом, равным радиусу кривизны 1-го вертикала. С учетом формул разложения тригонометрических функций в ряды для двух членов ряда, зависимости, определяющие переход из географической системы координат в прямоугольную, следующие [3]:

$$x = X + \frac{Nl''^2}{2\rho''^2} \sin B \cos B + \frac{Nl''^4}{24\rho''^4} \sin B \cos^3 B (5 - \operatorname{tg}^2 B), \quad (1)$$

$$y = \frac{l''}{\rho''} N \cos B + \frac{l''^3}{6\rho''^2} N \cos^3 B (1 - \operatorname{tg}^2 B), \quad (2)$$

где  $X$  — длина дуги меридиана от экватора до параллели с широтой  $B$  (длины дуг меридиана от экватора до параллелей с любыми широтами вычисляются заранее или берутся готовыми из таблиц Гаусса-Крюгера);  $l = L - L_0$  — разность долгот между меридианом с заданной точкой  $L$  и осевым меридианом;  $N$  — радиус кривизны первого вертикала в точке на поверхности сферы с широтой  $B$  и долготой  $L$  (берется из таблиц Гаусса-Крюгера или вычисляется заранее);  $\rho''$  — поправка из-за перехода к секундам (табличное значение).

Проведение операций в прямоугольной системе координат Гаусса-Крюгера предусматривает приведение масштаба изображений к данной проекции. При этом учитывается, что данная проекция конформная, следовательно, масштабы по главным направлениям должны быть равны:  $m=n$ . Учитывается тот факт, что главные направления совпадают с направлениями, параллельными сфероидическим осям координат, а в проекции — с направлениями, параллельными осям координат  $x$  и  $y$ :

$$m = n = \frac{1}{1 - \frac{y^2}{2N^2} + \frac{y^4}{24N^4}} = 1 + \frac{y^2}{2N^2} + \frac{5y^4}{24N^4}. \quad (3)$$

Для обратного перехода из системы прямоугольных координат к географическим, вводится ряд допущений. Для известной абсциссы точки, для которой необходимо найти  $B$  и  $L$ , из таблиц Гаусса-Крюгера [3] определяется широта точки, соответствующей основанию ординаты (сферического перпендикуляра) —  $B_{f_{cf}}$ . Таким образом формулы перехода следующие:

$$(B_{f_{cf}} - B)'' = \frac{y^2}{2M_{f_{cf}} N_{f_{cf}}} \rho'' \operatorname{tg} B_{f_{cf}} \left[ 1 - \frac{y^2}{12N_{f_{cf}}^2} (5 + 3\operatorname{tg}^2 B_{f_{cf}} + \eta_{f_{cf}}^2 - 9\eta_{f_{cf}}^2 \operatorname{tg}^2 B_{f_{cf}}) + \frac{y^4}{360N_{f_{cf}}^4} (61 + 90\operatorname{tg}^2 B_{f_{cf}} + 45\operatorname{tg}^4 B_{f_{cf}}) \right], \quad (4)$$

где  $\eta_{f_{cf}} = \cos B_{f_{cf}} \sqrt{\frac{e^2}{1 - e^2}}$ ;  $e$  — первый эксцентриситет;  $M_{f_{cf}}$  — радиус кривизны меридиана для долготы  $L_f$  (берется из таблиц по значению долготы  $L_f$  ( $f_{cf}$  — сферический перпендикуляр, восстановленный в точке с известными координатами  $x$  и  $y$ )).

Искомая широта  $B$  определяется методом приближений по значению разности ( $B_{f_{cf}} - B$ ), а разность долгот определяется по формуле:

$$l'' = \frac{y}{N_{f_{cf}} \cos B_{f_{cf}}} \rho'' \left[ 1 - \frac{y^2}{6N_{f_{cf}}^2} (1 + 2\operatorname{tg}^2 B_{f_{cf}} + \eta_{f_{cf}}^2) + \frac{y^4}{120N_{f_{cf}}^4} (5 + 28\operatorname{tg}^2 B_{f_{cf}} + 24\operatorname{tg}^4 B_{f_{cf}} + 6\eta_{f_{cf}}^2 + 8\eta_{f_{cf}}^2 \operatorname{tg}^2 B_{f_{cf}}) \right]. \quad (5)$$

Искомая долгота определяется как:  $L = L_0 + l$ , где  $L_0$  — долгота осевого меридиана зоны. Такой подход обеспечивает более высокую точность привязки по сравнению со стандартными методами обработки.

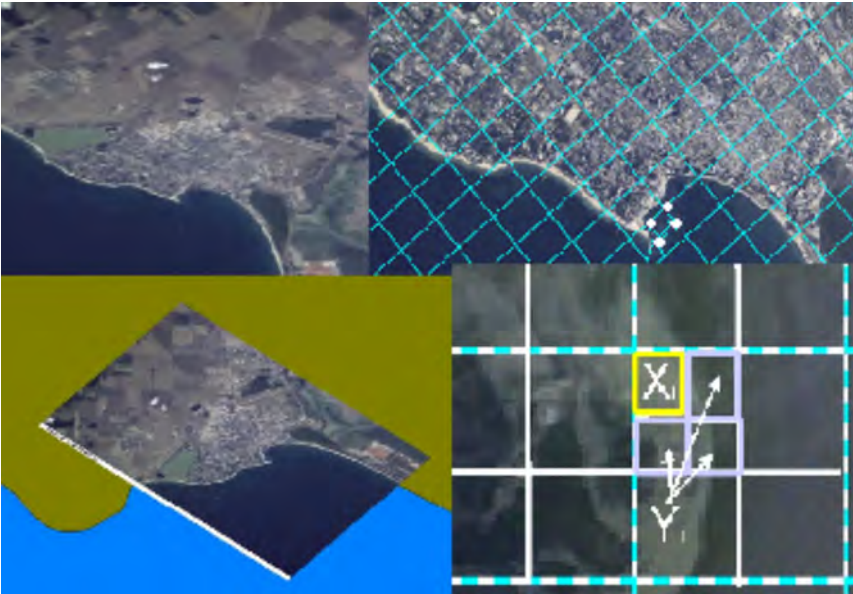
Поскольку для привязки узловых и связующих точек снимка к координатам опорных точек на местности используются приближенные значения элементов ориентирования, указан-

ные в комментариях к снимку, то в случае неполного набора этих данных или их отсутствия возникает ряд сложностей. При наличии параметров о движении космического аппарата, на их основе в результате геометрических вычислений возможно восстановление элементов ориентирования. Однако при отсутствии данных об источниках получения информации, а именно, когда запрашиваемые снимки представляются в синтезированном виде, при трансформировании такого снимка (для его преобразования в экранную систему координат в заданной картографической проекции) выполнить стандартные операции - пространственную интерполяцию и интерполяцию значений яркости пикселей. Преобразование применяется ко всем пикселям снимка.

Для реализации операций, связанных с обработкой данных изображений после проведения фотограмметрической нормировки предложен метод иерархического построения данных изображений в виде «критериальных деревьев». В основе предлагаемого метода лежит порядок сканирования Мортонa. В отличие от разбиения по Мортону, в котором адреса конечных фрагментов (листов) привязаны к снимку, в «критериальных деревьях» привязка адресов конечных листов осуществляется по географическим координатам. Разбиение снимка на фрагменты до уровня гомогенности по предложенному методу осуществляется согласно заданным критериям с их последовательной индексацией [4]. В результате получается адаптивное разрешение растрового изображения, где участки с меньшей плотностью информации представлены крупными блоками ячеек, а с большей плотностью — мелкими блоками ячеек (рис. 4).

Учитывая ту особенность, что космические снимки представляют собой большой объём элементов изображения, результаты сегментации представляются в виде фрагментов, а не элементов, как в традиционном виде, с кодами, определяющими их принадлежность к ветвям «критериального дерева», соответствующих различным классам объектов, пространственными индексами для каждого узла зоны и атрибутами, характеризующими вероятность попадания в наиболее опасную зону с учетом априорно заданных данных полевых исследований. Реализация такого подхода позволяет получить набор правил,





*Рис. 4. Последовательность действий при выделении гомогенного фрагмента.*

определяющих сегментацию, на сравнительно небольшом фрагменте, а затем использовать его для всего снимка или совокупности снимков, что позволяет значительно сократить время обработки и сэкономить память. Следует заметить, что разбиение в «критериальных деревьях» не накладывает ограничений относительно формы сегмента и не предусматривает задания шага сегментации, а информация о гомогенности должна извлекаться непосредственно из снимков, не прошедших дополнительную обработку. Для определения степени близости между показателями, характеризующими фрагмент дерева, содержащего аномалию и показателями, характеризующими соседние фрагменты, проводится корреляционный анализ. В случае выявления значимых корреляционных связей между какими-либо анализируемыми показателями для них строятся зависимости методами регрессионного анализа.

Для иерархического описания в рамках унифицированного информационного подхода и формализованного представления изображений в виде графов и математических моделей целесообразным является применение дескриптивного подхода к алгебре изображений [5]. Такой подход позволяет использовать алгебру колец для описания последовательности операций с данными мониторинга в виде иерархического формализованного представления не только изображений, но и процессов их обработки, что повышает эффективность решения таких задач, как построение описаний изображений для их анализа и распознавания и адаптацию алгоритмов обработки к специфике прикладных задач. Для реализации предлагаемого подхода должны быть выполнены условия алгебраического формализма [6]:

а) каждый объект является иерархической структурой, построенной с помощью операций алгебры изображений из фрагментов «критериальных деревьев» (гомогенные блоки);

б) в качестве объектов используются точки, множества, модели, операции, лингвистические переменные;

в) каждое преобразование является иерархической структурой, соответствующей новым разностным «критериальным деревьям», построенной с помощью операций алгебры изображений из набора базисных преобразований [5].

В качестве операндов алгебры предложено использовать алгоритмы и описания входной информации, представленные в виде нетрансформированных изображений, полученных с помощью дистанционного зондирования Земли и данных контактных методов зондирования в виде логико-алгебраических моделей. При условии их выполнения в соответствии с дескриптивным подходом к «критериальным деревьям» процессы иерархической обработки описывают следующие операции:

1) композиция трансформированных входных изображений, приведенных к единой системе координат и заданной проекции в результате фотограмметрической обработки ( $A_0$ ) с помощью алгебраических операций ( $A_1$ ) преобразованных в «критериальные деревья» — заключительный этап получения гомогенных фрагментов;

2) построение векторных оценок ( $A_2$ ) и определение весовых коэффициентов по соответствующим критериям для каждого из фрагментов в результате операций ( $A_1$ );

3) преобразование этих оценок с целью получения простых числовых оценок ( $A_3$ ) для всей имеющейся информации.

В предложенном алгоритме кольцо  $A_0$  соответствует операциям алгебры изображений, строящим преобразования входных изображений в некоторые модели, кольцо  $A_2$  соответствует алгоритмам, преобразующим изображения в некоторые векторные оценки, кольцо  $A_1$  соответствует моделям объектов, а кольцо  $A_3$  соответствует числовым оценкам. Результатом практической реализации данного подхода для автоматизации процесса построения «критериальных деревьев» является супералгебра, соответствующая привязанному гомогенному фрагменту изображения, содержащего выявленную аномалию.

Для автоматизации операций с построенным «критериальным деревом», связанных с локализацией различных аномалий и уточнением их границ, предложено при определении степени принадлежности анализируемого элемента к заданному классу объектов учитывать физиологические аспекты зрения. Для этого каждому из этапов зрительного восприятия в соответствие ставится математическая модель описания. Такой подход позволяет устранить субъективизм человеческого фактора при дешифрировании [4]. Результаты программной реализации представлены на рис 5.

Для автоматизации процесса формирования эталона и порога сравнения вводились бинарные переменные, характеризующие наличие или отсутствие минимального анализируемого элемента на изображении. Преобразования производились на основе классической формулы критерия минимума среднего риска и введенной неотрицательно определенной функции потерь для каждого из возможных исходов, и решающего правила, соответствующего минимизации среднего риска, который является байесовским критерием принятия решения. При этом в отличие от классического алгоритма, допускающего распределение оценки по нормальному закону и определение факта наличия анализируемого элемента на изображении по дисперсии и математическому ожиданию, в качестве вероятностной модели оценки использовалось двухпараметрическое гамма-распределение, которое обладает свойством устойчивости и позволяет путем варьирования его параметров описывать широкий диапазон поведения случайной величины.

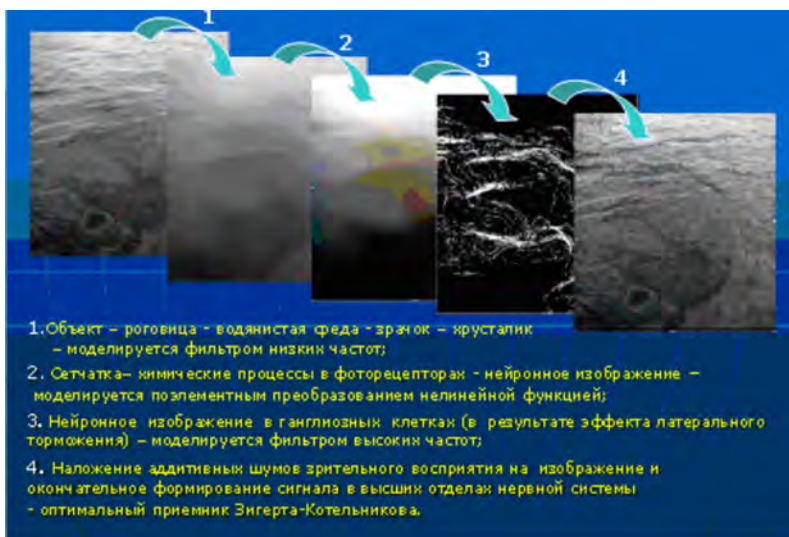


Рис. 5. Программная реализация модели зрительного восприятия.

После уточнения границ выявленной аномалии с привязанным гомогенным фрагментом — листом «критериального дерева» и соответствующими фрагментами архивных деревьев для автоматического выявления изменений неоднородностей производятся различные алгебраические и оверлейные операции. Результатом является полученное разностное «критериальное дерево», индексирующее все совмещенные фрагменты наложенных изображений снимков и содержащее атрибуты всех анализируемых фрагментов [4].

На рис. 6 объекты, отражательная способность которых изменилась незначительно за время между двумя съемками, окрашены на разностном снимке в светло-серые тона, а темные и яркие области снимка соответствуют значительным изменениям отражательной способности.

Алгоритм получения разностных «критериальных деревьев» следующий. Одновременно обходятся все деревья, следуя существующим в них ветвям. В тех узлах, где у одного из деревьев отсутствует ветвление, значение атрибута переносится на все последующие подуровни. При определении топологии

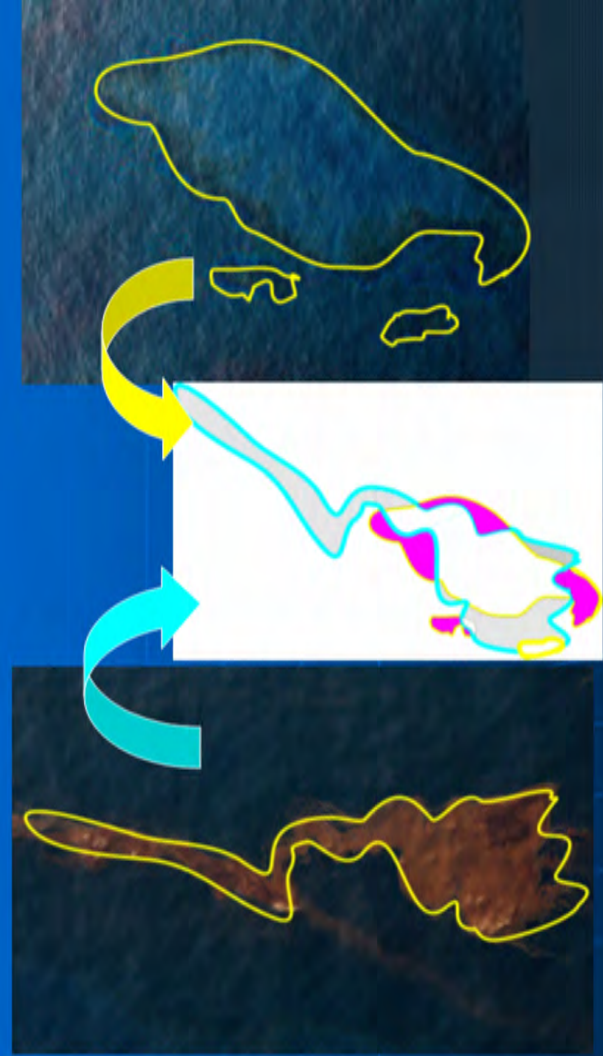


Рис. 6. Визуальное представление алгоритма оверлейной операции на «критериальном дереве».

объекта, в отличие классического алгоритма, требующего значительных временных затрат, когда для определения площади фрагмента с некоторым значением в растровом слое, необходимо обойти все дерево и подсчитать количество листов, кодированных этим значением и взвешенное площадью ячейки на данном уровне дерева предложено эту операцию проводить во внутреннем «критериальном дереве».

При анализе векторных данных пространственные индексы, присвоенные выделенным фрагментам, используются для более быстрого доступа к представляющим интерес объектам в определенном фрагменте изображения. Индексирование пространственных объектов используется для уменьшения вычислительной сложности процедур поиска аномалий сложной формы. Для оценки промежуточных результатов сегментации среди множества алгоритмов был выбран алгоритм, основанный на использовании оценок связности, поскольку при анализе изображений для дальнейшего построения прогноза рассматриваются не только данные дистанционного зондирования Земли, но и контактных методов, картографические и инфологические характеристики зоны исследований.

Проведение операций с разновременными «критериальными деревьями» позволяют экономить время построения временных рядов и снизить требования к оперативной памяти за счет работы не со всем изображением, а только с гомогенными листами. Иерархическая организация данных позволяет использовать и получать более быстрые алгоритмы доступа к пространственным данным.

## **2. Метод комплексирования разновременных разнородных данных**

Для решения задач 2-го направления использован механизм анализа и оценки состояния аномалий на основе логико-алгебраических моделей комплексирования данных дистанционного зондирования и контактных методов, имеющих как качественные, так и количественные характеристики, методы определения возмущающих факторов для восстановления причинно-следственных связей возникновения аномалии и определение возможных тенденций развития аномалий.

Комплексная обработка и совместный анализ разнородных данных возможен с использованием метода формализации алгебраических операций на основе логико-алгебраических моделей. Данный метод позволяет объединять количественные и качественные характеристики, структурировать и формализовать единым математическим языком внутренние «критериальные деревья», проводить операции с пространственными индексами, значениями приоритетов вершин деревьев и значениями временных рядов. В качестве параметров логико-алгебраических моделей для формализации алгебраических операций предложено использование построенных в виде иерархической структуры атомарных алгебр, выполняющих операции только с одним типом данных и композиционных алгебр, выполняющих операции на основе атомарных. Алгоритм взаимосвязи «композиционных алгебр», атомарных и возможных операций при построении логико-алгебраических моделей следующий:

1. Фаззификация (введение нечеткости) [7] результатов преобразования алгебры  $B_{ij}^{K_{nm}}$  алгебрами  $A_{ij}^{K_{nm}}$ :

$$B_{ij}^{K_{nm}} \oplus A_{ij}^{K_{nm}} \Rightarrow \overline{B_{ij}^{K_{nm}}}.$$

2. Построение продукционных правил взаимодействия алгебр:

$$A_{ij}^{K_{nm}} \oplus \overline{B_{ij}^{K_{nm}}} \Rightarrow \overline{D_{ij}^{K_{nm}}}.$$

3. Определение соответствия преобразованных алгебр (агрегирование):

$$\overline{\overline{D_{ij}^{K_{nm}}}} \oplus \overline{\overline{B_{ij}^{K_{nm}}}} \Rightarrow D_{ij}^{K_{nm}}.$$

4. Аккумуляция результатов агрегирования:

$$\cup D_{ij}^{K_{nm}} \Rightarrow \overline{C_{AB}^{K_{nm}}}.$$

5. Дефаззификация (введение четкости) значений алгебры  $\overline{C_{ij}^{K_{nm}}}$ :

$$C_{AB}^{K_{nm}} = \frac{\sum_{i,j=1}^l \overline{B_{ij}^{K_{nm}}} \cdot \overline{C_{AB}^{K_{nm}}}}{\sum_{i,j=1}^l \overline{C_{AB}^{K_{nm}}}}$$

Такой подход к формализации алгебраических операций позволяет при тематическом дешифрировании учесть дополнительные признаки, которые при стандартных методах обычно отсеиваются, и сформировать значения пространства переменных состояния в единой шкале.

При определении возмущающих факторов для оценки возможных процессов развития анализируемой аномалии, необходимым является восстановление причинно-следственных связей ее возникновения по результату формирования пространства откликов и признаков текущего состояния объекта и установления между ними взаимосвязи, определение зоны информативности для динамических переменных и определения соответствия качественных признаков, присущих аномалии, количественным оценкам. Для определения соответствия качественных признаков количественным оценкам и отсева избыточности факторов, оказывающих влияние на развитие аномалии, при формировании информативного множества признаков предложено использование алгоритма Флойда и построение матрицы максимального влияния [4, 8].

В условиях ограниченной априорной информации о свойствах процесса развития аномалии, для получения количественных оценок, определяющих значения откликов на различные изменения входных воздействий на основе логико-алгебраических моделей [1, 8] между ними устанавливается взаимосвязь по следующей схеме:

При этом необходимо учитывать, что наиболее вероятное состояние аномалии характеризуется двумя основными группами, определяющими противоположные линии развития, состояние индифферентности в реальных условиях невозможно. Пространство откликов формируется в соответствии с дешифровочными признаками и данными контактными методами на основе построения продукционных моделей с определением степеней истинности для всех возможных комбинаций





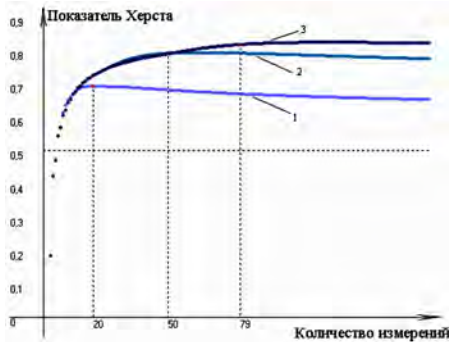
Рис. 7. Схема формирования откликов.

[7]. Для получения количественных оценок, характеризующих отклонения откликов на изменения входных воздействий, предложено использование метода нормированного размаха Херста внутри каждой из ветвей текущего внутреннего «критериального дерева» и аналогичных фрагментов деревьев из базы знаний. Такой подход обусловлен тем, что для моделирования каждого конкретного отклика на действие отдельных возмущающих факторов и на их комплексное воздействие требуется определить значения групповых и обобщенных показателей, характеризующих состояние аномалии в целом. Сопоставление полученных показателей Херста значениям откликов позволяет установить зависимость между коэффициентами матрицы максимального влияния и изменением дешифровочных признаков и сформировать матрицу отклонений значений откликов на изменения входных воздействий при определении

пороговых значений для пространства управляющих параметров. Определенная по итоговому значению показателя Херста тенденция изменения построенного временного ряда при наличии существенных возмущений и в отсутствие новых снимков показывает степень отклонения вероятностных характеристик второго порядка от характеристик классического распределения.

В отличие от статистических методов прогнозирования, в которых все факторы полагаются случайными или неопределенными, учет синергетичности процесса для нелинейных неустойчивых систем предполагает определение границ устойчивости решений. Прежде всего, вызывает сложность определение динамических переменных внутри интервальных участков вблизи «жестких» границ, определяющих переход аномалии из одного состояния в другое и соответственно в бассейн другого аттрактора [9]. Такой переход характеризует внезапное изменение тенденции поведения аномалии, вызывает изменение количества откликов и значений вектора информативных признаков, и, как правило, говорит о высокой вероятности перехода к одному из 7 типов элементарных катастроф. Поскольку переменные, описывающие соответствие дешифровочных признаков моделируемому состоянию аномалии, определяются в условиях ограниченной априорной информации, метод нормированного размаха Херста предложено использовать для определения скорости изменения градиента цвета в окрестностях граничных точек аномалии по всей совокупности снимков внутри «камерных» подсистем, характеризующих незначительные изменения в ее поведении. Для отсева избыточности введенных факторов и переменных, вводимых на этапе анализа и синтеза моделей для их адаптации к изменяющимся условиям в пределах исследуемого процесса, необходимым является определение зоны информативности для динамических переменных и выбор наиболее информативного диапазона изменения дешифровочных признаков (цветовых каналов, наиболее чувствительных к уровню изменения неоднородностей аномалии и окружающей среды) [10]. Поскольку эти характеристики прежде всего, зависят от радиометрической чувствительности съемочной аппаратуры и свойств аномалии, для их учета был определен нормировочный коэффициент:  $K_{\text{норм}} = 10 \cdot (I_{\text{max}} - I_{\text{min}}) / 255$ , где  $I$  — максимальное и минимальное

значения интенсивности на изображении. Результаты проведенных исследований позволили установить зависимость между полученными значениями показателя Херста для оценки интервалов предсказуемости поведения временного ряда и определением количества необходимых измерений для выявления границы перехода внутри листа «критериального дерева». Установлено, что наиболее оптимальное количество измерений равно пятидесяти. Информативность результатов применения данного подхода определяется порогом перепада интенсивности, равным десяти (рис. 8). При этом полученные характеристики не зависят от типа анализируемого процесса [10].



а

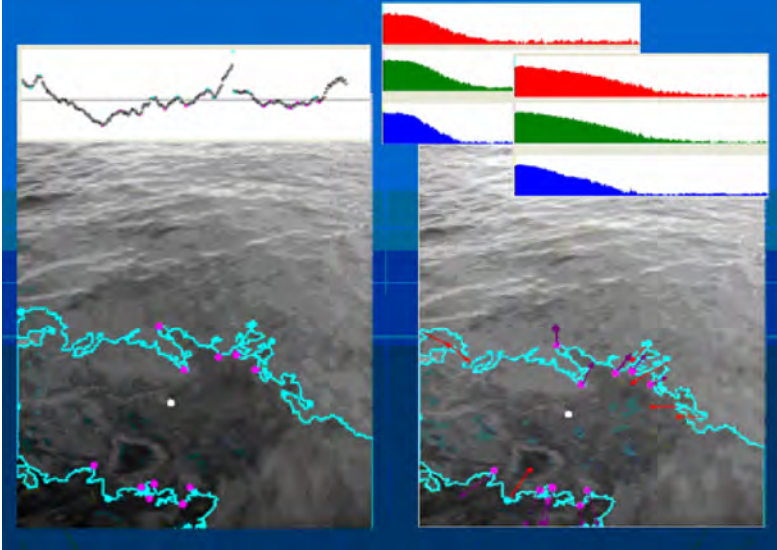


б

Рис. 8. Изменение значений показателей Херста при различных входных параметрах.

Кривая 1 на графиках соответствует перепаду значений яркости 40, состоянию 2 — перепад значений яркости 10, а 3 — перепад значений яркости 5. При этом рис. 8, а соответствует последовательное увеличение яркости, а рис. 8, б — периодическое изменение яркости относительно равновесного состояния (ось ординат являются значения показателя Херста, осью абсцисс — значения интенсивности). Как видно из рис. 8, периодические изменения значений дешифровочных признаков относительно стационарного состояния являются автоколебательными, не вызывают существенных его изменений. Областям устойчивости решений на таких участках соответствуют «мягкие» границы, определение которых не представляет особых сложностей. Аналитическим описанием динамики поведения системы внутри «камерных» подсистем, характеризующих регулярное поведение аномалии является нелинейная модель на основе отдельных локальных логистических уравнений с определением неподвижных точек логистического отображения [9] по равенству нулю динамических переменных во времени. Переход к логистическим отображениям для описания динамики поведения аномалий внутри «камерных» подсистем осуществляется методом Понтрягина, поскольку алгебраические уравнения, поставленные в соответствие дифференциальному уравнению, получают применение разностного метода, а их решение соответствует приближенному решению дифференциальной задачи. Камерность системы, описывающей процесс развития аномалии, определяется по равенству единице Якобиана. В таком случае присутствует явление эргодичности, что дает возможность вычисления статистических средних по ансамблю и усреднению по времени в пределах камерной подсистемы, соответствующей бассейну одного и того же аттрактора. Такой подход дает основание считать, что усреднение значений показателей Херста всех смежных ячеек, имеющих значение больше 0,5, является достаточным для построения предварительного прогноза в общей зоне и необходимым при определении точек максимальной энтропии, наиболее подверженных изменениям, и в которых переход аномалии из одного состояния в другое наиболее вероятен. Для определения таких точек проводится совместный анализ топологических характеристик, градиентов яркости, результатов проведения метода историчес-

кой аналогии и учета персистентности процесса распространения аномалии (рис. 9).



*Рис. 9. Определение точек максимальной энтропии.*

На рис. 9 показаны точки максимальной энтропии, характеризующие процесс развития аномалии как инволюционный и эволюционный, представлены наиболее вероятные направления изменения аномалии в целом, анализ которых совместно с данными контактных методов позволяет определить предполагаемые границы прогнозируемого изменения аномалии и оценить скорость этих изменений.

### **3. Определение прогнозируемых количественных характеристик изменений геометрии и структуры аномалий с оценкой возможных последствий**

Для решения задач 3-го направления, непосредственно связанных с построением прогноза предложены методы определения управляющих параметров, точек бифуркации и формул для расчета поправок к координатам объекта. Поскольку

используемые в настоящий момент методы прогнозирования адаптированы под конкретные прикладные области, и их использование предполагает ряд значительных ограничений, был предложен обобщенный метод определения поправок к координатам объекта и получения количественных характеристик изменения его структуры. Для этого для каждой из контрольных точек, соответствующих точкам максимальной энтропии составляются уравнения поправок [11]

$$\forall k = 1 \div i, \exists \left\{ \begin{array}{l} \left[ (x_k) + 2H_x \sum_{i=1}^n \frac{\partial x}{\partial g_i} K_{ix} \delta x_{gi} \right] - x_k = v, \\ \left[ (y_k) + 2H_x \sum_{i=1}^n \frac{\partial y}{\partial g_i} K_{iy} \delta y_{gi} \right] - y_k = v', \\ \left[ (z_k) + 2H_x \sum_{i=1}^n \frac{\partial z}{\partial g_i} K_{iz} \delta z_{gi} \right] - z_k = v'', \end{array} \right. \quad (6)$$

где  $i$  — количество контрольных точек;  $n$  — количество рассматриваемых факторов влияния (размерность вектора параметров);  $g_i$  — функциональная зависимость, определяющая влияние на объект  $i$ -го фактора;  $K_x, K_y, K_z$  — значения весовых коэффициентов для каждого конкретного фактора, характеризующие степень влияния на аномалию и определяемые из графа непосредственного влияния на объект;  $\delta x_{g_i}, \delta y_{g_i}, \delta z_{g_i}$  — поправки к координатам, которые необходимо вычислить, чтобы определить зону смещения опорных точек в результате влияния рассмотренных факторов;  $H_x$  — значение показателя Херста, характеризующее время изменения параметров объекта;  $(x), (y), (z)$  — значения координат опорных точек текущего снимка (на 1-м этапе расчета) или вычисленные в результате решения уравнений с учетом поправок;  $x, y, z$  — значения координат опорных точек, относящихся к первому снимку (на 1-м этапе расчета) или значения, соответствующие предыдущим расчетам уравнений поправок (априорные данные).

Уравнения поправок составляются для каждой из опорных (соответствующих контрольным) точек. Построенные уравне-

ния решаются при условии  $[pv^2 + pv'^2 + pv''^2] = \min$  методом последовательных приближений.

Построение представленных уравнений предполагает описание закономерностей изменения параметров аномалии, вызывающих ее деформацию во времени, конечной аналитической зависимостью с учетом степени влияния каждого из возмущающих факторов на изменение координат ее контрольных точек и интегрального показателя степени их комбинаторного влияния.

Наличие структуры в виде пространства управления, пространства переменных состояния и поверхности откликов дает основание для отнесения анализируемого процесса к элементарной катастрофе. Для определения перехода анализируемого процесса развития аномалии к катастрофе необходимо определить параметры управления и точки бифуркации. Для получения оценок, определяющих переход аномалии в один из семи типов элементарных катастроф, процесс формирования параметров управления рассматривался с точки зрения универсальности и масштабного подобия. В качестве параметров управления рассматривались факторы, определяющие изменение значений откликов в условиях неопределенности, такие как, «джокер» — фактор или совокупность факторов, внезапно переводящие систему в другую точку фазового пространства, «русла» — области фазового пространства, где система ведет себя согласно прогнозу без отклонений с заданной точностью и определяется лишь несколькими переменными [12] и усредненные значения показателя Херста. Отсутствие четких определений для указанных ситуаций привело к необходимости построения математических моделей принятия решений в условиях неопределенности. Установлено, что русла располагаются вблизи точек с начальными условиями, а «джокеры» — на краю зоны бассейна аттрактора. Графические зависимости, определяющие поведение отклика в условиях неопределенности, характеризуемой наличием указанных параметров управления [13] представлены на рис. 10.

Для оценки близости бассейнов зон действия простых аттракторов целесообразным является использование инвариантов тензора напряжений, а именно, инвариантов по Морю — сжатия и сдвига, определяемых через шаровую и девиаторную

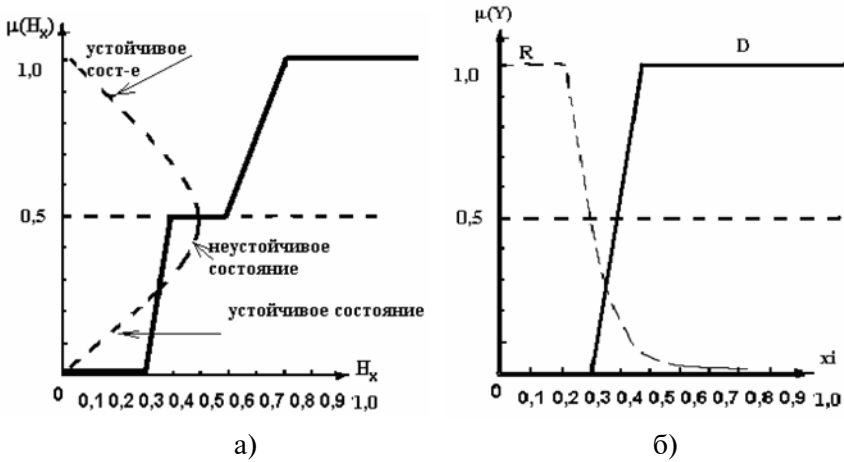


Рис. 10. Итоговый график определения функции принадлежности  $\mu(Y)$  к бассейнам различных аттракторов от значений весовых коэффициентов:

- а) — для усредненных значений показателя Херста;
- б) — для ситуаций «джокер» и «русло».

части тензора [14, 15]. Это связано с тем, анализируемая аномалия с математической точки зрения рассматривается как поверхность, а малая окрестность любой точки деформируется по одному и тому же закону. Определение предельного расстояния между бассейнами аттракторов возможно с помощью функции-нормы. Для получения значения функции-нормы и, соответственно, для определения момента перехода аномалии в один из типов элементарных катастроф определяются величины, характеризующие степень деформации и область их распространения в окрестности этих точек — изменение длины и углов направлений после деформации. Наличие инварианта тензора и инвариантность среднеквадратичной деформации свидетельствуют о стабильности аномалии в бассейне первого аттрактора, а точки, в которых деформации перестают быть системными сдвигами, являются точками бифуркации и позволяют сделать вывод о возможном переходе в бассейн второго аттрактора.



#### **4. Практическая реализация рассмотренных методов для прогнозирования процессов развития разнородных аномалий**

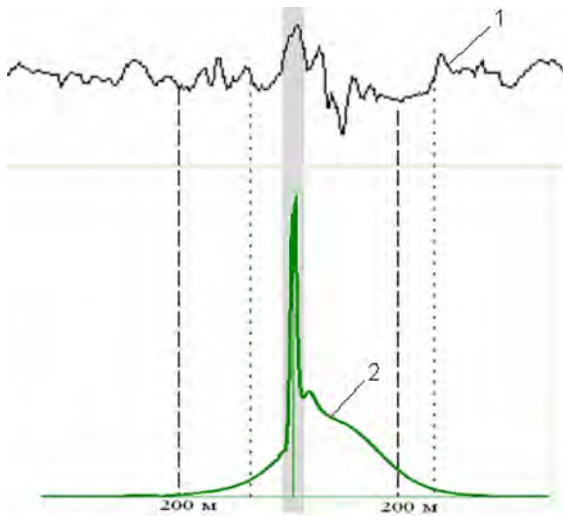
Для оценки адекватности предложенных методов был проведен анализ данных мониторинга участков местности, содержащих аномалии, имеющие различную структуру (зоны загрязнения выбросом автомобильного транспорта на примере Гусятинского района Тернопольской области [16, 17], зона распространения фитопланктона на водохранилище вблизи Хмельницької АЕС [18], оценки экологического состояния бассейна Аральского моря) с оценкой их возможной динамики [19]. Построенный прогноз показал целесообразность использования предложенных методов для повышения точности определения предполагаемых границ распространения аномальных явлений в природных экосистемах. Временные ряды строились на основании данных, полученных различной съемочной аппаратурой. Следует заметить, что все снимки подвергались стандартным видам обработки, производилась географическая привязка, визуализация и трансформация изображений по орбитальным элементам спутника. Все анализируемые данные были совмещены с точностью до пикселя.

Для определения динамики изменений зоны загрязнений выбросами автомобильного транспорта анализ дешифровочных признаков проводился на основании яркостного распределения градаций цвета перпендикулярно направлению дороги (рис. 11, 12). Показано, что распределение уровня загрязнения не соответствует нормальному закону, что позволяет сделать вывод о целесообразности использования предложенного метода для решения этой задачи. Для проверки результатов расчета проводился сравнительный анализ результатов программной реализации предложенных методов (рис. 12) и дешифровочных признаков по снимку, соответствующему реальному состоянию на момент прогноза (рис. 11).

При построении прогноза предполагаемого изменения фитопланктона прежде всего учитывались основные факторы, влияющие на его развитие: энергетические (солнечная активность) и субстратные (биогенные элементы). Основные субстратные факторы, ограничивающие развитие фитопланктона в природе:



*Рис. 11. Изображение анализируемого участка дороги.*



*Рис. 12. Локализация загрязнений:  
— — - прогноз по стандартным методам;  
... - прогноз по разработанным методам  
1 — гистограмма распределения яркости;  
2 — рассчитанный уровень загрязнения.*

фосфор (P) и азот (N). При анализе изображений учитывалось время получения изображений и, как следствие, влияние сезонных изменений. Временные ряды строились на основании снимков, полученных с борта космического аппарата «IKONOS» за период времени 2002, 2004, 2005, 2007 гг. (рис. 13).

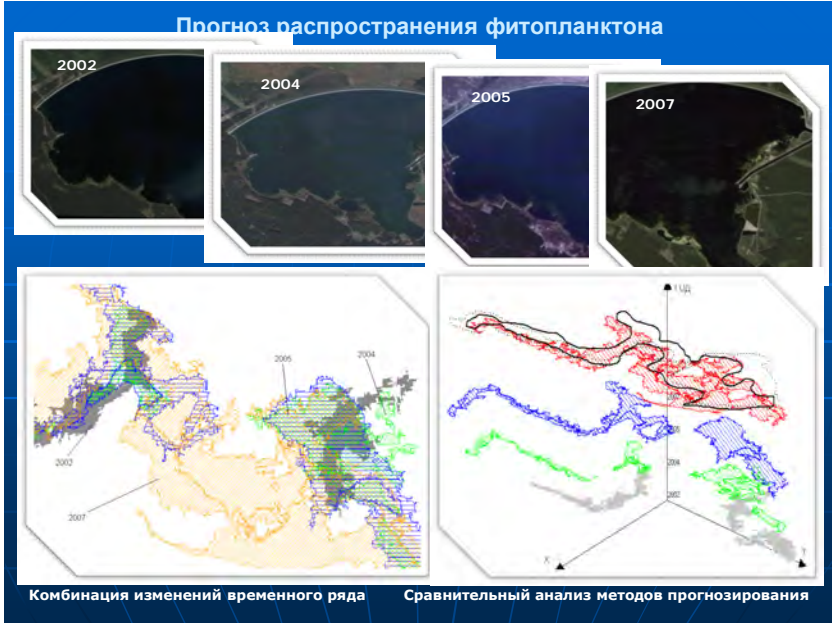


Рис. 13. Программная реализация построения прогноза изменений концентрации фитопланктона.

При обработке учитывались изменения дешифровочных признаков, связанные с сезонными характеристиками, влияющими на уровень и концентрацию фитопланктона.

Прогноз по разработанным методам на рис. 13 изображен сплошной линией, а по стандартным методам — пунктирной. Концентрация фитопланктона определялась по статистическим характеристикам (мат. ожиданию, дисперсии, модальности) с учетом распределения незараженных фитопланктоном поверхностей. Определенные дополнительно площади поражения

фитопланктоном за анализируемый временной ряд, наряду с топологическими и спектральными характеристиками, являются априорными данными для построения прогноза его дальнейшей динамики. Прогноз изменения уровня концентрации и площади распространения фитопланктона на водохранилище в районе Хмельницкой АЭС строился на основании дешифровочных признаков представленных изображений, результатов их обработки и статистических данных, полученных контактными методами зондирования. Полученные в работе гистограммы спектральных характеристик за период с 2002 по 2007 гг. (рис. 14) позволяют сделать вывод о том, что с целью минимизации ошибки определения площади распространения фитопланктона целесообразно все измерения проводить в зеленом спектральном диапазоне. В качестве оси абсцисс рассмотрено распределение интенсивности в интервале от 0 до 255. Данные по оси ординат характеризуют количество пикселей данной интенсивности.

В качестве исходных данных при построении прогноза динамики изменений Аральского моря использовались архивные снимки со спутника IRS-1D камеры LISS разрешением 23 м за один месяц (рис. 15) [19]

Степень изменения границ моря и береговой линии оценивалась по разности цветовой яркости. Дополнительно определены «критериальные деревья», соответствующие разновременным данным, содержащие локализованную площадь Аральского моря и смежных с ним участков. Результатом проведения оверлейных операций с полученными гомогенными фрагментами является разностные «критериальные деревья», характеризующие изменения площади за анализируемый промежуток времени с 2005 по 2009 гг. Измерения проводились в течение одного месяца. Сравнительный анализ методов прогнозирования проводился без использования данных за 2009 год, поскольку, как видно из рис.15, после строительства плотины в 2008 году процесс пересыхания моря затормозился, водный объем начал восстанавливаться, что повлекло за собой частичное восстановление площади моря. Изменения распределения солевых отложений представлено на рис. 15, при этом распределение соли показано более темным цветом. Классификация

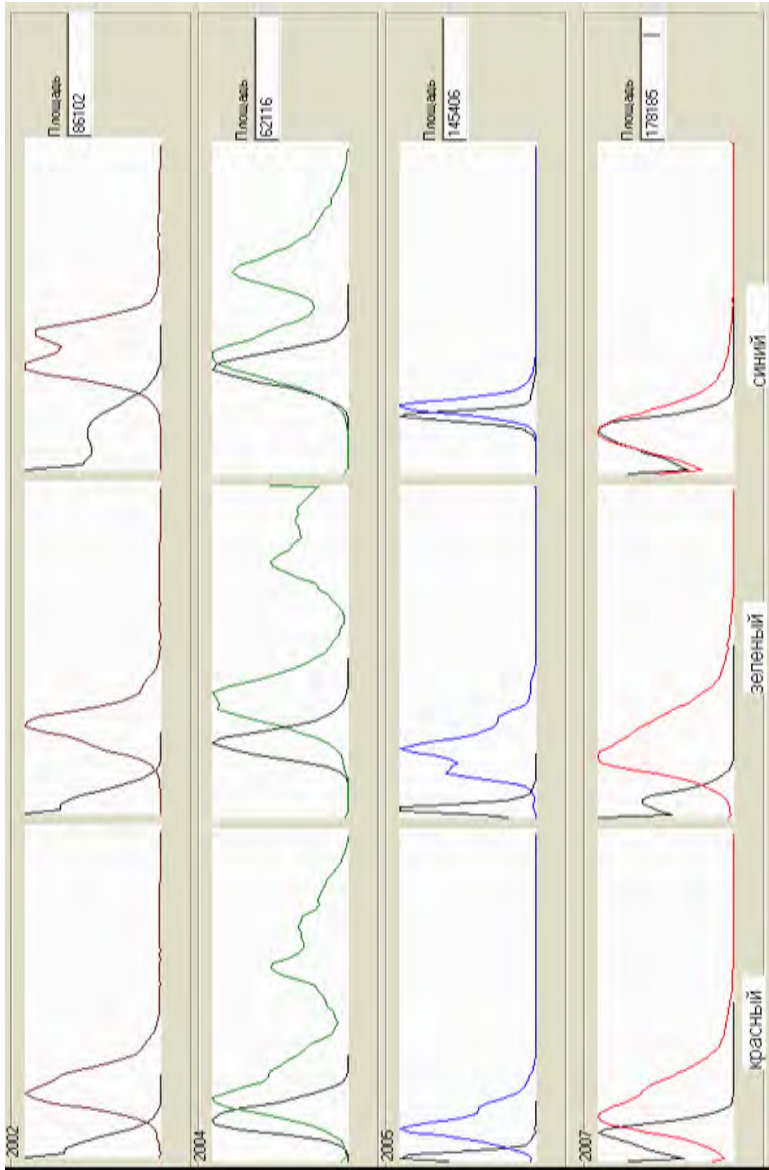


Рис. 14. Гистограмма распределения признаков признаков фитопланктона в различных цветовых каналах.



изменений, происходящих в районе Аральского моря, осуществлялась на основании анализа значений показателей Херста, оценки степени превышения заданного порога изменений координат объекта с учетом рассчитанных поправок и аксиомы о том, что контрольные точки, в которых деформации перестают быть системными сдвигами, являются точками бифуркации и характеризуют переход аномалии в один из типов элементарных катастроф. Значения показателя Херста рассчитывались по временным рядам, построенным по архивным «критериальным деревьям» на основе изменения распределения солевых отложений в смежных ячейках. Сравнительный анализ построенного прогноза по предложенным методам, стандартным и реальными данными (рис. 16) на 2009 год показал целесообразность использования разработанных методов (рис. 17).

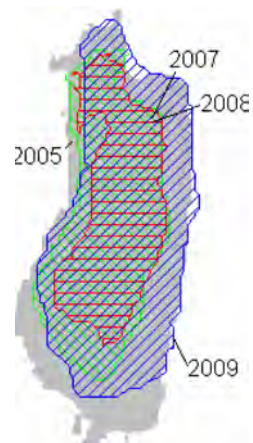


Рис. 16. Изменение геометрии морской поверхности за период 2005—2009 гг.

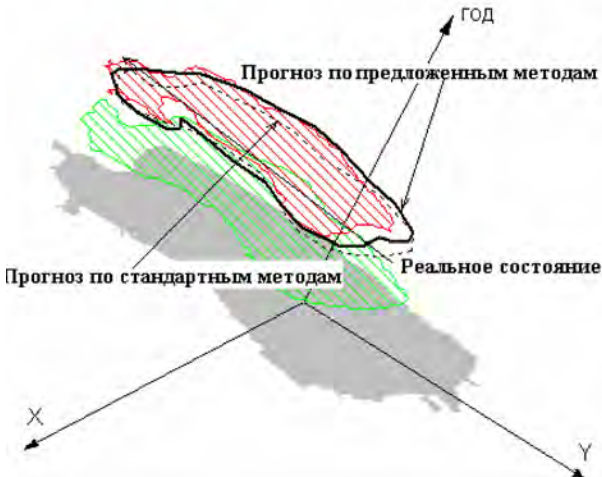
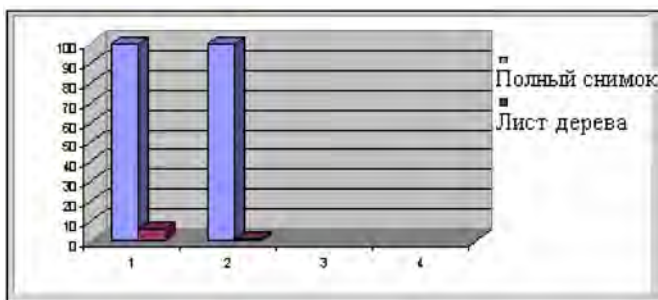


Рис. 17. Сравнительный анализ методов прогнозирования.

## **Заклучение**

Повышение оперативности построения прогноза по предложенным методам достигается экономией информационных ресурсов за счет уменьшения объема обрабатываемых данных (затраты оперативной памяти уменьшаются в 8 раз) и снижения требований к временным затратам на анализ и доступ к пространственным данным (экономия временных ресурсов достигает 53%). А также за счет повышения точности и быстродействия алгоритмов определения топологических характеристик аномалий на основе оверлейных операций с разновременными «критериальными деревьями» от 60 до 90 процентов (в зависимости от размера аномалии). Сравнительный анализ временных затрат классических и предложенных методов обработки применительно к фрагменту изображения 20×20 пикселей представлены на рис. 18. Дополнительно временные затраты сокращаются при проведении операций комплексирования информации и за счет устранения избыточности факторов влияния при формировании вектора параметров состояния объекта.



*Рис. 18. Сравнительная гистограмма объема занимаемой памяти.*

На рисунке этапу 1 соответствует первоначальное выделение однородных сегментов, когда обработка проводится по всему полю снимка, а этапу 2 — работа с выделенными на первом этапе сегментами.

\* \* \*

1. Бутенко О.С. Сценарий альтернатив развития изменения состояния аномальных экологических объектов при комплекс-



ном воздействия возмущений / О.С. Бутенко // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии: сб. научн. трудов Нац. аэрокосм. ун-та «ХАИ». — Вып. 46. — Х.: 2010. — С. 225—237.

2. Попов М.А. Фотограмметрическая обработка и дешифрирование аэроснимков: учеб. пособие, ч. 1. / М.А. Попов, В.Л. Моисеев. — К.: КВВАИУ, 1991. — 224 с.

3. Закатов П.С. Курс высшей геодезии: учеб. пособие / П.С. Закатов — М: Недра, 1976. — 511 с.

4. Сучасні інформаційні технології екологічного моніторингу Чорного моря / [О.М. Трофімчук, В.В. Радчук, Г.Я. Красовський, О.С. Бутенко, С.М. Андреев, С.І. Березіна та ін.] — К.: Інформаційні системи, 2010. — 252 с.

5. Гуревич Ю.И. Построение алгебр изображений на основе дескриптивного подхода / Ю.И. Гуревич, Ю.Г. Сметанин // Математические методы распознавания образов: доклады 9-й Всероссийской конференции. — Москва, 1999. — С. 33—36.

6. Бутенко О.С. Алгебраический подход к операциям с изображениями при разработке единой концепции для создания универсальной многопараметрической геоинформационной системы. / О.С. Бутенко // Системи управління, навігації та зв'язку: зб. наук. праць Центрального науково-дослідного інституту навігації і управління. — Вип. 3(11). — К.: 2009. — С. 36—40.

7. Леоненков А.В. Нечеткое моделирование в среде MATLAB и fuzzy TECH / А.В. Леоненков. — СПб.: БХВ-Петербург, 2005. — 736 с.

8. Бутенко О.С. Метод формирования возможных откликов при определении тенденции развития аномалий техногенного происхождения / О.С. Бутенко, В.А. Жилин // Збірник наукових праць ХУПС. — Вип. 2(24). — Х.: 2010. — С. 150—152.

9. Братченко Н.Ю. Разработка схемы исследования нелинейных динамических систем / Н.Ю. Братченко, Северо-Кавказский государственный технический университет, [Электронный ресурс] — режим доступа: <http://www.tisbi.org/science/vestnik/2005/issue2/MatMet11.html>

10. Бутенко О.С. Метод повышения информативности показателей Херста для определения границ устойчивости решений при прогнозировании динамики аномалий / О.С. Бутенко,

С.И. Березина, Ю.А. Черных // Збірник наукових праць ХУПС. — Вип. 3(15). — Х.: 2010. — С. 243—246.

11. Бутенко О.С. Усовершенствование методологии прогнозирования динамики объекта / О.С. Бутенко // Радиоэлектронні і комп'ютерні системи. — 2009. — № 2(36). — С. 155 — 160.

12. Малинецкий Г.Г. Сценарии, стратегические риски, информационные технологии / Г.Г. Малинецкий. — М.: Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН, 2002. — 124 с.

13. Бутенко О.С. Сценарий формирования пространства управляющих параметров при анализе возможности перехода различных аномалий в один из типов элементарных катастроф / О.С. Бутенко // Зб. наук. праць ХУПС. — Вип. 3(21). — Х.: 2009. — С. 200—204.

14. Пинежанинов Ф. Математика в механической прочности [Электронный ресурс]. — режим доступа: [http:// http://www.exponenta.ru/soft/mathemat/pinega/a12/a12.asp](http://www.exponenta.ru/soft/mathemat/pinega/a12/a12.asp)

15. Бутенко О.С. Использование тензорного анализа для определения точек бифуркации в процессе прогнозирования состояния нестабильной системы экологического происхождения / О.С. Бутенко, С.И. Березина // Системи обробки інформації: зб. наук. праць ХУПС. — Вип. 2(83). — Х.: 2010. — С. 30—36.

16. Бутенко О.С. Механізм визначення кількісних характеристик рівня концентрації забруднюючих речовин викидами автомобільного транспорту / О.С. Бутенко, В.А. Охарев // Екологічна безпека та природокористування: Зб. наук. праць Ін-ту телекомунікацій і глобал. Інформ. простору НАНУ і Київ. Нац. ун-ту буд-ва і арх. — Вип. 3. — К.: 2009. — С. 14 — 33.

17. Триснюк В.М. Екологія Гусятинського району Тернопільської області / В.М. Триснюк; под. ред. Адаменко О.М. — Тернополь: ТзОВ Терно-граф, 2005. — 224 с.

18. Нестерова Д.А. Развитие фитопланктона северо-западной части Черного моря в весенний, летний, осенний периоды / Д.А. Нестерова // Биология моря. — Вып. 43. — К.: 1977. — С. 17—23.

19. Бакашева А.У., Ткачева И.П. Определение изменений границ северной части Аральского моря (Малого Арала) за 2004—2009 гг. Земля из космоса — наиболее эффективные решения. Вып. 5. 2010. — С. 84—87.

**Отримано: 21.07.2011 р.**