

Сценарий альтернатив развития изменения состояния аномальных экологических объектов при комплексном воздействии возмущений

Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ»

Предложен комплексный подход к построению сценария прогнозируемого изменения состояния объекта, представляющего собой выявленную на космическом снимке аномалию, образуемую в результате воздействия совокупности различных факторов. Проанализированы признаки, характерные для исследуемой аномалии, позволяющие восстановить причинно-следственные связи ее возникновения. Предложен механизм построения уравнений для определения прогнозируемых смещений координат контрольных точек исследуемой аномалии. Рассмотрена возможность ее перехода к одному из типов элементарных катастроф на основе комплексирования качественных и количественных показателей, характеризующих аномалию, с использованием алгебры нечеткой логики.

Ключевые слова: прогноз, аномалия, причинно-следственные связи, сценарий, воздействие.

Введение

Предлагается теоретическое обоснование разработки сценария прогнозируемого изменения состояния объекта, представляющего собой выявленную на космическом снимке аномалию, вызванную результатом комплексного воздействия на нее совокупности возмущающих факторов. В основе предлагаемого сценария лежит разработка моделей и методов, позволяющих установить причинно-следственные связи ее возникновения. На их основе рассмотрены возможные альтернативы дальнейшего развития рассматриваемой аномалии.

Для построения сценария необходима разработка новых критериев для оценки последствий воздействия каждого возмущающего фактора с выработкой приоритетов матрицы возможных откликов.

Предлагаемую методологию можно условно разделить на следующие этапы:

1. Исследование свойств и структуры аномалии.
2. Проведение метода исторической аналогии.
3. Построение модели возникновения аномалии.
4. Классификация процесса распространения аномалии – отнесение его к классу стационарных или нестационарных случайных процессов по непараметрическим критериям, показателю Херста и коррелограмме.
5. Построение модели входных воздействий и матрицы возможных откликов. Для этого предлагается метод построения промежуточного прогноза на основе анализа дерева откликов по каждой из его ветвей и построение моделей возможного поведения каждого из факторов воздействия в соответствии со значениями дерева приоритетов их воздействий.
6. Определение сценария перехода от порядка к хаосу (независимо от того, какими уравнениями описывается система, существует всего несколько универсальных сценариев). Для этого необходимо достаточно точно определить зоны действия различных аттракторов и границы их пересечения, силу возможного воздействия каждого из факторов и силу их комбинаторного влияния для минимизации интервалов этих областей в траектории разбегания параметров и увеличе-

ния в месте сходимости, и определение условий и предельных значений возмущающих факторов вероятного перехода их значений из бассейна одного аттрактора в бассейн другого;

7. Построение вектора параметров для ситуации «Джокер» и «Русло» при комбинаторном влиянии факторов. Определение границ их влияния.

8. Построение предиктора с учетом пунктов 1-7.

1. Механизм построения сценария альтернатив изменения аномалии

Ставится задача определения свойств объекта по параметрам космических снимков и данных контактных методов зондирования Земли с дальнейшей их оценкой. Рассматривается возможность комплексного подхода к формированию количественных показателей, характеризующих объект, заключающегося в совместном использовании метода нормированного размаха Херста и правилами, построенных на нечеткой логике. Иными словами, речь идет о принятии решения при дешифрировании анализируемого объекта с учетом косвенных признаков. Данная задача сводится к оптимальному поиску распознаваемых элементов на изображении, их предварительной классификации с целью извлечения максимального количества дешифровочных признаков и определения соответствующих им количественных оценок. Однако, поскольку рассматриваются возможные альтернативы распространения аномальных объектов, то следует учесть, что при динамическом прогнозировании возникает необходимость использования моделей, базирующихся на понятиях текущих состояний объекта. Принятие единственно правильного решения о дальнейшей динамике распространения аномалии возможно, если в основе моделей при описании свойств объекта используется обоснованный выбор факторов возмущений с оценкой силы их максимального воздействия на аномалию. При анализе свойств и структуры аномалии необходимо дополнительно учитывать влияние совокупности факторов, связанных с разными науками, такими как биология, экология, химия и пр. Данная проблема является сложной, поскольку все эти факторы описываются большим числом трудно определяемых переменных, взаимосвязи между которыми нелегко установить. Для решения таких задач приходится делать довольно сильные упрощающие допущения, формулируемые в математических терминах, что позволяет избежать многих двусмысленностей естественного языка.

Метод исторической аналогии заключается в установлении момента времени возникновения аномалии, определении особенностей местности и получении статистической выборки на тот момент времени (например, роза ветров, температура, наличие катаклизмы природного происхождения и пр.). Эти данные определяются в результате поиска зоны объекта по координатам на картах, в архиве снимков, и по анализу информации указанной в отчетах, составленных по данным контактных методов зондирования в анализируемый период времени.

Результат использования оверлейных операций с фрагментами «критериальных деревьев» (наложение, сложение и вычитание) [1, 2] позволяет обнаружить различные изменения вектора параметров, определенного по текущему изображению по сравнению с априорно заданными данными векторов, полученных в результате применения ранее метода исторической аналогии применительно к исследуемой территории. Как правило, основные изменения затрагивают площадь и форму контуров полигонов. Используя алгебру «критериальных деревьев» можно уточнить топологические характеристики аномалии и рассчитать поправки к выявленным изменениям ее формы и площади за заданный период времени [3].

Предварительный вывод о характере аномалии при изучении ее свойств можно сделать только после проведения процедуры камерального дешифрирования с привлечением различной вспомогательной информации, заключающейся в логическом анализе данных контактных методов зондирования и результатов метода исторической аналогии. При этом основными показателями вектора параметров в соответствии с данными дистанционного зондирования Земли будут: яркостные признаки (для материалов панхроматической съёмки), эквиваленты зональных яркостей (для материалов многозональной съёмки), эквивалент УЭПР (для радиолокационных изображений). В случае, когда для визуализации многозональных изображений используют процедуру синтеза в условных цветах, то дешифровочными признаками также будут характеристики цвета. В качестве структурных признаков необходимо рассматривать размер и форму объектов, характер распределения яркости в пределах объекта и текстуру изображения [4].

Комплексный подход к анализу данных, полученных из заданных априори «критериальных деревьев» и информации об условиях наблюдаемой местности, изучению предпосылок возникновения аномалии, позволяет построить временной ряд, используемый при прогнозировании процессов, связанных с распространением аномалии. Однако для построения даже кратковременного прогноза этих данных недостаточно. Необходимо наличие в векторе параметров количественной оценки качественных характеристик. Для этого на основе теории нечетких множеств разрабатывается ряд продукционных моделей с которыми в дальнейшем проводятся, основанные на нечеткой логике [1, 5].

Для построения моделей, позволяющих восстановить процессы, имеющие место при возникновении аномалии необходимы дополнительные исследования, связанные с комплексным влиянием различных возмущений на объект, установления зависимостей между самими возмущающими факторами для восстановления причинно-следственных связей возникновения аномалии.

Существует несколько стандартных подходов к моделированию динамических процессов и прогнозированию изменений происходящих в рассматриваемой системе (под системой понимается реальный участок территории, соответствующий изображению на анализируемом снимке). И способ моделирования, и способ выдачи предварительного прогноза определяется спецификой исходной информации, представленной в виде временных рядов по параметрам исследуемого объекта. При этом адекватность модели определяется качеством исходной информации в соответствии с её количественным представлением [6]. При моделировании ситуации возникновения аномалии и построении сценария дальнейшего ее распространения необходимым является установление взаимосвязей большого количества переменных и факторов, взаимодействующих друг с другом, и реагирующих на изменения каждой другой переменной. Степень взаимного влияния анализируемых факторов и их непосредственного воздействия на объект определяется весовыми коэффициентами [7, 8]. При определении значений весовых коэффициентов учитываются особенности объекта, установленных ранее. Такой подход позволяет оценить возможную корреляцию соседних листьев «критериального дерева», построенного по текущему снимку и корреляцию взаимного воздействия факторов архивных «критериальных деревьев и, как следствие, изменение границ анализируемой аномальной зоны.

Наличие стохастической и лингвистической неопределенности при описании прогнозируемого процесса, связанного с возможными изменениями объекта, а также совместное использование количественных и качественных характеристик при формировании пространства переменных состояний, не позволяет дать одно-

значный ответ – произойдет ли прогнозируемое событие, оправдается ли построенный прогноз, и насколько он будет точен [5, 10]. Для решения задач, связанных с моделированием различных аспектов неопределенности теория вероятностей использоваться не может, поскольку необходимо расширение границ интервала возможных вариантов течения процесса с определенной степенью вероятности. Для различных комбинаций анализируемых возмущений с учетом диапазона силы их возможного воздействия должен рассчитываться консеквент [6]. Значения функций принадлежности и консеквента являются основой для построения модели измененной аномалии и дополняют вектор параметров для прогнозирования изменения формы и определения новых границ зоны распространения в отсутствие последующих снимков. Однако, в силу избыточности входных данных в векторе параметров необходимо определить факторы максимального влияния на объект с коэффициентами, характеризующими силу их возможного воздействия и провести классификацию информативности признаков (факторов) не по одному, а по нескольким критериям. Прежде всего, нужно определить принадлежность результата их воздействия на аномалию к одному из двух классов: стационарных или нестационарных случайных процессов [11]. В первую очередь подлежит определению то, каким образом информация об уровнях состояний объекта под действием возмущающих факторов приводит к выбору решений, связанных со скоростью изменения соответствующих параметров, характеризующих аномалию. Данная информация позволяет принять единственно правильное решение о дальнейшей динамике объекта.

Анализ экологических проблем затрагивает чрезвычайно сложные системы, содержащие большое число переменных, взаимодействующих друг с другом, реагирующих на изменения каждой другой переменной и т.п. Эти взаимодействия могут быть представлены в виде причинно-следственных отношений, которые можно выразить в виде графовых моделей взаимодействия (критериальных деревьев, гиперграфовых структур). Такой подход позволяет в соответствии с заданными критериями (пороговые значения весовых коэффициентов зон вероятного загрязнения, степень однородности изображения, и пр.) выработать степень взаимосвязи всех листьев каждого «критериального дерева», построенного по априори заданным снимкам [1, 2, 3].

После проведения классификации процессов, характеризующих динамику объекта под воздействием различных возмущений и в различных условиях, необходимым этапом является построение дерева откликов и дерева приоритетов возможных воздействий факторов влияния на изменение качественных и количественных характеристик рассматриваемого процесса или явления [3]. В основе построения дерева приоритетов при формировании модели входных воздействий лежат результаты применения метода исторической аналогии с оценкой предполагаемых последствий и учетом их комплексного влияния на объект исследований по результатам анализа причинно-следственных связей [3]. Дополнительно подлежат анализу количественные характеристики степени влияния этих факторов друг на друга и их влияние на изменение координат опорных точек исследуемой аномалии в целом. Эти показатели определяются в результате применения алгоритма Флойда при построении матрицы коэффициентов максимального влияния [7]. При этом учитываются многочисленные примеры ситуаций, связанных с различными техногенными рисками. Зачастую для этого применяются известные критерии, используемые в теории принятия решений [12] в условиях неопределенности. Однако из-за противоречивости решений, получаемых по различным критериям, очевидна необходимость применения оценок прогнозирования и проведе-

ния классификации рисков, поставив при этом задачу оценивания каждого конкретного риска с их структуризацией. Иными словами деревья причин строятся в результате анализа сформированного вектора параметров и дерева последствий. Для этого последовательно моделируется реакция каждого отклика на совокупность возмущающих факторов с определением значений обобщенных показателей, характеризующие состояние процесса или явления в целом.

Используемые в настоящий момент современные компьютерные технологии прогнозирования, как правило, основаны на интерактивных статистических методах прогнозирования с использованием баз данных и экспертных систем, имитационных и математических динамических моделей, сочетающих экспертные, математико-статистические и моделирующие блоки. Однако все эти технологии и методы адаптированы под конкретные объекты и процессы, условия их функционирования и развития и имеют ряд жестких ограничений, касающихся начальных условий. Таким образом, общности подхода в настоящий момент не существует. Пространство признаков, определяющих текущее состояние объекта формируется на основе консеквента факторов наибольшего влияния. В результате каждому из дешифровочных признаков ставится в соответствие инфологическая характеристика, описывающая состояние изображенного на снимке объекта. Полученные характеристики формируют пространство откликов [3, 10]. Использование для этих целей метода нормированного размаха Херста предполагает прогнозирование только тенденции развития динамики объекта, а точнее предполагаемой тенденции развития построенного временного ряда. Предполагаемая оценка возможной динамики аномалии и соседних по отношению к исследуемой зоне фрагментов может быть получена без определенных количественных характеристик [11]. Для получения количественных характеристик необходимо перейти от дихотомической шкалы (0 или 1) по непараметрическим критериям к Херсту (нечеткая, но количественная от 0 до 1) согласно правил нечеткой логики [5].

Уровень значений показателя Херста должен определяться в соответствии с наложением нечеткого множества на четкое множество (0,1 до 1). При этом возможные значения нечеткого множества характеризуются следующими определениями: от 0,1 до 0,2 –распространение практически невозможно; 0,3-0,4- распространение при учете дополнительных факторов, (анализ возмущающих факторов на свойство аддитивности и изменение откликов в результате их совместного воздействия на объект); 0,5 – использование дополнительных методов прогнозирования, и пересчет показателя для большего количества временных рядов, сформированных на основании архивных данных, определение вероятности возникновения ситуаций «джокер» (фактор или совокупность факторов, который может оказаться решающим и внезапно перевести систему в другую точку фазового пространства) и «русло» (область фазового пространства, где система ведет себя согласно прогнозу без отклонений с заданной точностью и определяется лишь несколькими переменными [3, 13]) с определением границ их влияния; 0,6-0,8 – определение функции принадлежности зоны перехода на «складке»; 0,9-1,0- сильная тенденция к усилению динамики. В результате наложения каждому значению нечеткого множества соответствует интервал из четкого, для чего выбирается середина соответствующего интервала, формируются массивы значений вектора состояния и скорости его изменения [5]. Согласно предложенной шкале каждому значению лингвистической переменной соответствует определенное нечеткое множество со своей функцией принадлежности (рис. 1), например, для численных значений показателя Херста по разным временным рядам или для

смежных листьев внутри «критериальных деревьев» функция принадлежности имеет следующий вид:

$$\mu(H_x) = \begin{cases} 0 \leq H_x < 0,3; & 0 \\ 0,3 \leq H_x < 0,4; & 5x-1,5 \\ 0,4 \leq H_x < 0,6; & 0,5 \\ 0,6 \leq H_x < 0,8; & 2,5x-1 \\ 0,8 \leq H_x; & 1 \end{cases}$$

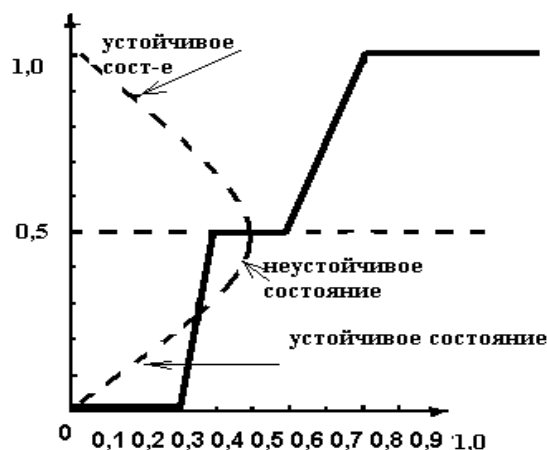


Рис. 1

Как известно [5,6], над нечеткими множествами можно производить различные операции, при этом они определяются так, чтобы в случае, когда множество является четким, операции переходили в обычные операции теории множеств [6]. Поскольку обобщение может быть реализовано различными способами, то какой-либо операции над обычными множествами может соответствовать несколько операций в теории нечетких множеств. По признаку однородности/неоднородности области значений функции принадлежности, все виды нечетких множеств являются гомогенными в том смысле, что одна и та же структура области значений функции принадлежности берется при оценке всех элементов универсального множества [6]. Если на различных элементах универсального множества функция принадлежности принимает свои значения из различных наиболее подходящих математических структур, то множество является гетерогенным. Гетерогенные нечеткие множества и связанные с ними составные лингвистические переменные высокого порядка позволяют моделировать ситуации многокритериального принятия решения, когда имеются признаки, как с количественными, так и с порядковыми шкалами [5,6].

Совершенно очевидно, что детерминирующие составляющие признаки будут лишь усиливать процесс возможного развития ситуации, но значительных изменений поведения откликов не вызовут. Построение прогноза при использовании характеристик только таких факторов особых трудностей не представляет. Поэтому особое внимание следует уделить случайным факторам, особенно выбору линии поведения объекта в зависимости от их воздействия.

Для учета возможного возникновения неожиданных ситуаций, которые могут изменить направление предсказуемого поведения объекта, в качестве значений бифуркационного множества необходимо рассмотреть вероятность возникно-

вения «джокера», изменяющего направление развития системы, а именно количество откликов, и линию поведения объекта, и «русла», характеризующего стабильные области в фазовом пространстве и обеспечивающие минимум отклонений от статистического аттрактора. Ситуации возникновения «джокера» и «русла» практически равновозможны, и вероятность их возникновения прежде всего зависит глубины анализа причинно-следственных и точности и количества априорных данных. Поскольку возникновение «джокера» резко увеличивает число вариантов и степень неопределенности, а «русло» наоборот ведет к его стабилизации можно сделать вывод о том, что русла располагаются вблизи точек с начальными условиями, а «джокеры» - возле аттракторов на краю зоны недалеко от точки перехода из бассейна одного аттрактора в другой. Выскажем два предположения о том, что в течение некоторого момента времени, соответствующего периоду прогнозирования одновременно могут существовать ситуации перехода от «русла» к «джокеру». Отсутствие четких определений для ситуации «джокер» и «русло», а также определение совокупности совместного влияния факторов на возникновение данных ситуаций привело к необходимости построения математических моделей принятия решений в условиях неопределенности.

Для формального представления эмпирических знаний о степени влияния на аномалию ситуаций «джокер» и «русло», при создании базы правил систем нечеткого вывода [5] введены следующие обозначения - Y – выходная лингвистическая переменная, характеризующая степень совместного влияния факторов на распространение аномалии с качественными заключениями: R-“русло”, D-“джокер”: $Y = \{R, D\}$. В качестве входных параметров рассматривались лингвистические переменные, характеризующие количественные значения листьев дерева возможных воздействий:

1. Y_{x1} – степень влияния фактора x_1 ;
2. Y_{x2} – степень влияния фактора x_2 ;
3. Y_{x3} – степень влияния фактора x_3 ;
-
- n. Y_{xn} – степень влияния фактора x_n .

Входящие значения (x_1, x_2, \dots, x_n) соответствуют значениям из матрицы максимального влияния дерева приоритетов.

Шкала качественных термов для оценки значений всех лингвистических переменных – русло, джокер.

База правил нечетких продукций представляется правилами нечетких выводов вида:

R_1 : if is Y_{x1} is R & Y_{x2} is R && Y_{xn} is R then Y is R

R_2 : if is Y_{x1} is D & Y_{x2} is R && Y_{xn} is R then Y is R

.....

R_n : if Y_{x1} is D & Y_{x2} is D && Y_{xn} is D then Y is D

Фазификацией вводится нечеткость и устанавливается соответствие между конкретным числовым значением каждой входной переменной из матрицы максимального влияния и значением функции принадлежности соответствующего ей терма входной лингвистической переменной. Оценкой выходной лингвистической переменной Y являются качественные термы: R-“русло”, D-“джокер. Итоговый график, определяющий зависимость функции принадлежности $\mu(Y)$ всех термов-множеств, относящихся к оценке возникновения заданных ситуаций при распространении аномалии представлен на рисунке 2. Кривая, изображенная штрихпунктирной линией показывает изменение функции принадлежности для «русла», а сплошная кривая – для «джокера». Как видно из рисунка существует зона пересе-

чения возможных значений (интервал неопределенности), при которых возможно одновременное существование и «русла» и «джокера».

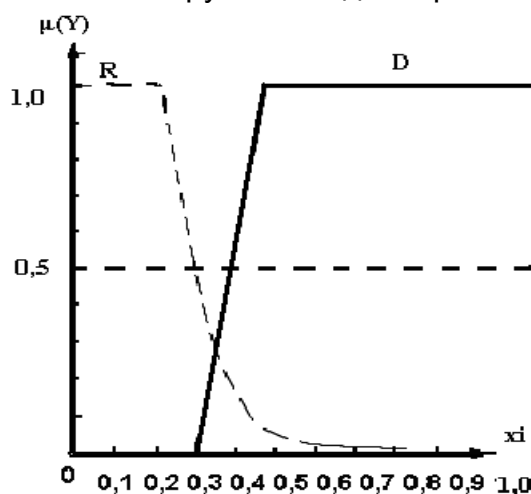


Рис. 2. График функции принадлежности качественных термов ситуаций «русло» и «джокер»

По виду кривых определяются функциональные зависимости функций принадлежности для каждой из рассматриваемых ситуаций, используемые при определении границ изменения прогнозируемой аномалии.

В качестве метода агрегирования рекомендуется использование операции min-конъюнкции:

$$\mu_c = \min \{ \mu_r(x_i), \mu_d(x_i) \}, \quad (\forall x_i \in X),$$

где c – значения степеней истинности соответствующих правил нечетких продукций. На основе выбранных активных продукционных правил со степенью истинности отличной от нуля производится активизация заключений. Метод активизации следующий:

$$\mu'(y) = \min \{ c_i, \mu(y) \},$$

где $\mu'(y)$ – функции принадлежности каждого из подзаключений для рассматриваемых выходных лингвистических переменных;

$\mu(y)$ – функция принадлежности терма, который является значением некоторой выходной переменной заданной на универсуме Y .

Аккумуляция заключений нечетких правил продукций проводится с использованием операции max-дизъюнкции: $Y = \max(R \vee D)$.

Дефазификацию целесообразнее всего выполнить, используя метод центра тяжести (центроида площади). После проведения дефазификации вероятность возникновения «джокера» с учетом сдерживания ситуации «руслом» следующая

$$N = \frac{\int_{\min}^{\max} x_i \cdot \mu(x_i) dx}{\int_{\min}^{\max} \mu(x_i) dx},$$

где x – переменная, соответствующая выходной лингвистической переменной; $x_i > 0,3$.

$\mu(x)$ – функция принадлежности нечеткого множества, соответствующего выходной лингвистической переменной (той же, что и x) после аккумуляции;

min и max – левая и правая точки интервала носителя нечеткого множества рассматриваемой выходной переменной.

Введение четкости для интегрального показателя I , полученного в результате проведения операций, характеризующего степень комбинаторного влияния на объект совокупности факторов (расчет консеквента), с учетом силы их возможного влияния, рассмотренного в работах [7,8] возможно путем дефазификации с помощью метода определения центра тяжести для одноточечных множеств:

$$I = \frac{\sum_{i=1}^n x_i \mu(x_i)}{\sum_{i=1}^n \mu(x_i)},$$

где n – число одноточечных (одно элементных) нечетких множеств, соответствующих подзаключениям, составленным из факторов влияния на аномалию, каждое из которых характеризует единственное значение рассматриваемой выходной лингвистической переменной.

В дальнейшем полученные показатели используются при построении формул для прогноза развития аномалий и предварительной оценки последствий ее распространения.

Для предварительной оценки возможных последствий необходимо рассмотреть возможность ее перехода в один из типов элементарных катастроф. Известно [14], что сечение бифуркационного множества представляет собой кривую вида:

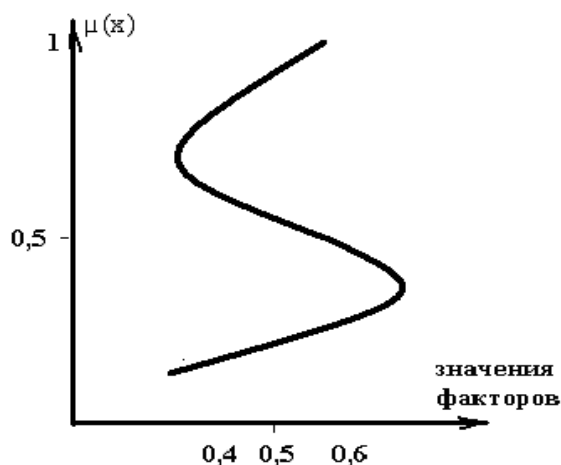


Рис. 3

Анализ рисунка 3 и рисунка 1 показывает, что переход из неустойчивого состояния в устойчивое, характеризующий разные состояния аномалии, осуществляется в точке перехода, соответствующей значению фактора возмущений с весовым коэффициентом равным 0,5 (по оси абсцисс откладываются значения весовых коэффициентов рассматриваемых факторов в соответствии с вектором входящих параметров). Факторы, значения которых меньше 0,5 и при этом не обладающие свойством аддитивности – отсеиваются. Для факторов, обладающих свойством аддитивности, но имеющих коэффициент меньше 0,5 производится суммирование значений их весовых коэффициентов и сравнение с порогом, равным предельному значению – 0,5. В случае если для какого-либо фактора не превышает порог функция принадлежности в соответствии с рисунком 3 больше 0,5 и для факторов, удовлетворяющих перечисленным выше условиям и не подлежащим отсеву, в соответствии с их значениями весовых коэффициентов стро-

ится графическая зависимость, определяющая поведение отклика в условиях различных параметров управления (русло, джокер, усредненный показатель Херста в зоне индифферентности с расчетом функций принадлежности для каждого конкретного управляющего параметра.

Установлено, что в интервале значений совокупности управляющих параметров от 0 до 0,3 и после 0,5 присутствует явление эргодичности по Больцману, что позволяет на этих промежутках ввести понятие усреднения для значений в бассейне одного и того же аттрактора различных факторов с разными начальными условиями. Таким образом, в случае, когда значения из области управляющих параметров принимают значения больше 0,3 со значением функции принадлежности больше μ_{Σ} необходимо учитывать вероятность возникновения ката-

рофы [3].

2. Механизм построения уравнений для определения предполагаемого смещения аномалии на период прогноза

При прогнозировании направления распространения аномалии необходимо определение зависимости влияния каждого из факторов на изменение координат контрольных точек объекта. Для этого необходимо выявить закономерности изменения параметров аномалии в результате воздействия различных факторов с оценкой степени их влияния. Найденная закономерность позволит описать процессы, вызывающие деформацию объекта во времени в любой его точке конечной аналитической зависимостью и оценить вызванные изменения. Для описания геометрической формы аномалии предлагается использовать классическое уравнение поверхности второго порядка относительно декартовых прямоугольных координат. При этом плановые координаты x, y определяются непосредственно из фотоснимков в результате фотограмметрических преобразований, а в качестве третьей координаты z рассматриваются значения яркости пикселей:

$$a_{11}x^2 + a_{22}y^2 + a_{33}z^2 + 2a_{12}xy + 2a_{13}xz + 2a_{23}yz + 2a_{14}x + 2a_{24}y + 2a_{34}z + a_{44} = 0 \quad (1)$$

Коэффициенты $a_{11} \dots a_{44}$ находятся в результате решения системы уравнений (1) для ряда контрольных точек матричным способом. В качестве контрольных точек используются точки, полученные в результате анализа точек максимальной энтропии, классифицирующие процесс распространения аномалии на инволюционный и эволюционный. При этом на выбор контрольных точек накладывалось ограничение: точки максимальной энтропии, используемые при построении предиктора в качестве контрольных не должны являться максимальными аттракторами. Однако это ограничение имеет смысл только при определении сдвижек координат объекта, который в результате предварительных исследований, рассмотренных выше, подвержен под воздействием ряда факторов к переходу в один из возможных семи типов элементарных катастроф. Избыточность количества этих точек может быть устранена в соответствии с величиной вектора, характеризующего максимальную скорость изменения формы аномалии.

Далее из графа усилений выбираются факторы f_i , максимально влияющие на изменение каких-либо координат аномалии в точках максимальной энтропии. В зависимости от того, какие координаты подвержены изменению в результате воздействия рассматриваемого фактора в уравнение поверхности вносятся изменения, а именно вместо коэффициентов при соответствующих переменных, наиболее подверженных изменениям, вводятся функциональные зависимости вида

$\varphi[f_i(x,y,z)]$, являющиеся функциями влияния каждого из факторов на изменение соответствующих координат. В результате экспериментальных исследований, проведенных в системе MATLAB по оценке точности аппроксимаций различными функциями для выбора наилучшей аппроксимирующей кривой был сделан вывод о том, что данную функциональную зависимость целесообразней всего рассматривать в виде кубической сплайн функции. Точность аппроксимации оценивалась тремя способами: по максимальной величине абсолютного отклонения экспериментальных данных от аппроксимирующей функции (максимальная ошибка), по максимальному значению квадрата ошибки или по среднему значению квадрата ошибки. Таким образом, в общем виде

$$\varphi(f_i) = a_i + b_i f_i + c_i f_i^2 + d_i f_i^3 \quad (2)$$

Коэффициенты a_i, b_i, c_i, d_i вычисляются методом среднеквадратического приближения (минимизацией суммы квадратов отклонений значений, определенных по текущему анализируемому и архивным снимкам). Следует заметить, что в отсутствие архивных снимков временной ряд может быть построен в результате проведения оверлейных операций с разностным и текущим критериальными деревьями, а искомые коэффициенты определены по значениям тензора напряжений для данных этого ряда.

После получения функциональных зависимостей, определяющих изменение формы аномалии в зависимости от силы воздействия на нее различных факторов, определения интегрального показателя и значений весовых коэффициентов, а также полученной вероятности возникновения ситуаций «джокера» и «русла» с анализом перехода аномалии в один из видов элементарных катастроф, строится общая формула выдачи кратковременного прогноза распространения анализируемой аномалии в некоторый период времени.

Рассмотрим введенные обозначения. Координаты контрольных точек, определенные по текущему изображению обозначаются как $(x), (y), (z)$. Координаты соответствующих точек, полученным согласно априорным данным (из эталонного или предыдущего снимка, в зависимости от этапа расчета) обозначены как x, y, z . Для каждой из этих точек составляются следующие уравнения поправок:

$$\forall k = 1 \div j \quad \begin{cases} \left[(x_k) + 2H_x \sum_{i=1}^n \frac{\partial x}{\partial f_i} K_{ix} \delta f_i \right] - x_k = v, \\ \left[(y_k) + 2H_x \sum_{i=1}^n \frac{\partial y}{\partial f_i} K_{iy} \delta f_i \right] - y_k = v', \\ \left[(z_k) + 2H_x \sum_{i=1}^n \frac{\partial z}{\partial f_i} K_{iz} \delta f_i \right] - z_k = v'', \end{cases} \quad (9)$$

где j – количество контрольных точек;

n – размерность вектора параметров;

f_i – функциональная зависимость, определяющая влияние i -го фактора на объект вида (2);

K_x, K_y, K_z – значения весовых коэффициентов для каждого конкретного фактора, характеризующих степень влияния на аномалию и определяемые из графа непосредственного влияния на объект (на возможное изменение каждой из коор-

динат объекта); и умноженные (усиленные) на вероятность силы возможных возмущений каждого из факторов,

$\delta x, \delta y, \delta z$ – 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, вычисляемое по формуле:

$$\frac{R}{S} = \left(\frac{N}{2} \right)^{H_x},$$

где N - произвольный параметр временного ряда;

$R(\tau) = \max_{t \in [1, \tau]} X_\tau(t) - \min_{t \in [1, \tau]} X_\tau(t)$ – функция размаха - разность между максимальным и минимальным значениями функции $X_\tau(t) = \sum_{i=1}^t (x_i - \langle x \rangle_\tau)$. При этом $\forall 1 \leq t \leq \tau \leq T$, $\langle x \rangle_\tau$ - среднее выборки на интервале $[0, \tau]$, а $\{x_i = x(t_i)\}$ - анализируемая выборка;

$\{x(t)\}$ – временной ряд, сформированный из дешифровочных признаков, характеризующих аномалию на изображении;

$$S(\tau) = \left[\frac{1}{\tau} \sum_{i=1}^{\tau} (x_i - \langle x \rangle_\tau)^2 \right]^{1/2} - \text{среднеквадратичное отклонение.}$$

Построенные уравнения решаются при условии $[p v^2 + p v'^2 + p v''^2] = \min$ методом последовательных приближений.

В результате решения системы уравнений и вычисления поправок $\delta x, \delta y, \delta z$ необходимо усреднить значения сдвижек

$$\Delta x = \frac{\sum_{i=1}^k \delta x_{xi}}{k}; \quad \Delta y = \frac{\sum_{i=1}^k \delta y_{yi}}{k}; \quad \Delta z = \frac{\sum_{i=1}^k \delta z_{zi}}{k}. \quad (10)$$

Используя полученные ранее значения интегрального показателя I , и значение вероятности создания неблагоприятной ситуации при суммарном воздействии всех факторов - «джокера» и «русла» N , окончательно определяется прогнозируемое смещение по координатам контрольных точек:

$$\begin{cases} P_{Rx} = N \times I \times \Delta x; \\ P_{Ry} = N \times I \times \Delta y; \\ P_{Rz} = N \times I \times \Delta z, \end{cases}$$

где P_{Rx} – ожидаемое смещение по координате x ;

P_{Ry} - ожидаемое смещение по координате y ;

P_{Rz} - ожидаемое смещение по координате z ;

Заключение

Комплексный анализ результатов дешифрирования изображений и данных, полученных контактными методами зондирования Земли, позволяет решить двойную задачу восстановления причинно-следственных связей возникновения

аномалии и определения тенденций дальнейшего ее развития. Задача решается путем формирования значений возможных откликов на воздействие каждого из возмущающих факторов, с анализом возможного перехода процесса распространения аномалии в один из типов элементарных катастроф [3, 14]. При этом учитываются не только качественные, но и количественные характеристики объекта. Таким образом, сценарий альтернатив изменения состояния аномальных объектов при комплексном воздействии возмущений выглядит следующим образом:

1. Формирование вектора входных параметров.
2. Анализ причинно-следственных связей.
3. Формирование пространства переменных состояния.
4. Выбор факторов максимального влияния.
5. Определение точек максимальной энтропии.
6. Формирование дерева причин и дерева возможных откликов;
7. Определение количественных оценок для качественных характеристик.
8. Расчет поправок к координатам контрольных точек.

Список литературы

1. 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 / Центральний науково-дослідний інститут навігації і управління. - Вип.3(11), - К., 2009. –С. 42-47.
2. Бутенко О.С. Анализ данных космического мониторинга при прогнозировании распространения выявленных аномалий /О.С. Бутенко, С.И. Березина, Г.Я. Красовский // Екологічна безпека та природокористування: зб. наук. пр./– К., Міністерство освіти і науки України. – 2009. - Вип. 2. – С. 23-41.
3. 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. пр. ХУПС. – Х.,: 2009. – Вип.3(21),–С. 141-145.
4. Красовский Г.Я. Космічний моніторинг безпеки водних екосистем із застосуванням геоінформаційних технологій –К.:Інтертехнологія, 2008. -480с.
5. Соколов А.Ю. Применение нечетких множеств в экспертных системах и системах управления: учеб. пособие. – / А.Ю. Соколов. – Х.: Гос. аэрокосм. ун-т “Харьк. авиац. ин-т”, 1999. – 64 с.
6. Леоненков А.В. Нечеткое моделирование в среде MATLAB и fuzzy TECH/ А.В. Леоненков. – Спб.: БХВ-Петербург, 2005. – 736 с.
7. Бутенко О.С. Механизм определения факторов максимального влияния на распространение нефтяной пленки / О.С. Бутенко, С.И. Березина, С.С. Красницкий // Проблеми розробки і впровадження сучасних інформаційних технологій моніторингу навколишнього середовища та управління екологічною і інформаційною безпекою в регіонах: зб. наук. пр. VIII Міжнар. наук. – практ. конф.ї Нац. аерокосм. ун-ту „ХАІ”, - Крим – Київ - Харків, 2009. – С. 162-171.
8. Бутенко О.С. Механізм забруднення довкілля автомобільним транспортом аномалий /О.С. Бутенко, В.А.Охарев // Екологічна безпека та природокористування: зб. наук. пр./ М-во освіти і науки України. - Вип. 3.- К., 2009.–С. 30-47.
9. Д.Г. Ворона, М.И. Кумсков. Программная реализация генетического алгоритма в задаче поиска метрик на структурных объектах. /Доклады 9-й Всерос. конф. «Математические методы распознавания образов», - М., 1999.– С. 154-156.

10. Дмитриев А.С. Прикладной динамический хаос / А.С. Дмитриев. - Ярославль: ЯрГУ, 1999. – 102 с.
11. Бутенко О.С. Анализ возможности прогнозирования распространения аномалий по данным космического мониторинга. /О.С. Бутенко // Системи обробки інформації: зб. наук. пр./ М-во оборони України.– Вип. 5(72).- Х., 2008.- С. 38-44.
12. Гаврилов А.В. Системы искусственного интеллекта: учеб. пособие: в 2 ч. / А.В. Гаврилов: – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2001. – Ч. 1. – 67с.
13. Малинецкий Г.Г. Сценарии, стратегические риски, информационные технологии / Г.Г. Малинецкий. – М.: Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН, 2002. - 124с.
14. Иен Стюарт. Тайна катастроф / И. Стюарт. – М.: Мир, 1987. – 76 с.
15. Бутенко О.С. Механизм построения кратковременного прогноза по априорным данным / О.С. Бутенко // Системи управління, навігації та зв'язку: зб. наук. р. / Центральний науково-дослідний інститут навігації і управління. – К., 2008. – Вип.3(7), – С. 37-40.

Рецензент: д.т.н., проф., Г.Я. Краковский, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков

Поступила в редакцию 07.06.10.

Сценарій альтернатив розвитку змін стану аномальних екологічних об'єктів при комплексному впливі збурень

Запропоновано комплексний підхід у побудові сценарію, що прогнозує зміни стану об'єкта, який є аномалією, виявленою на космічному знімку, під впливом сукупності різноманітних чинників з аналізом ознак, характерних для аномалії, яка досліджується при визначенні причинно-наслідкових зв'язків її виникнення. Запропоновано до розгляду механізм побудови рівнянь для визначення зміщення аномалії на період прогнозу з аналізом її можливого переходу до одного з типів елементарних катастроф при комплексуванні якісних і кількісних характеристик за допомогою алгебри нечіткої логіки.

Ключові слова: прогноз, аномалія, причинно-наслідкові зв'язки, сценарій, вплив.

Scenarios of making a forecast for changing anomaly due to the complex impact of factors

A complex approach for carrying out a forecasting scenarios of changing state of an object, which represents uncovered on space image anomaly due to the impact of different factors totality with the analysis of signs aggregate, that are typical for explored anomaly on its cause-investigation reconstruction links is introduced. The mechanism for compiling equation for determination predicted anomaly removal during the forecasting period with the analysis of its possible relation to one of the elementary disaster kinds in the tim of combining of quality and quantity characteristics with the use of illegible logic algebra is presented.

Keywords: Forecast, anomaly, cause-investigation links, scenarios, impact.