ОЦЕНИВАНИЕ СОСТОЯНИЙ ПРИРОДНО-ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ НА ОСНОВЕ ДИНАМИЧЕСКОЙ КЛАСТЕРИЗАЦИИ

А.В. Скатков, А.А. Брюховецкий, Д.В. Моисеев, В.И. Шевченко

Севастопольский государственный университет,
РФ, г. Севастополь, ул. Университетская, 33,
E-mail: dmitriymoiseev@mail.ru

Рассматриваются основные особенности, связанные с разработкой и исследованием методов интеллектуальной технологии оценивания состояний природно-технических систем. Предлагаемый подход позволит создать основу для моделирования процессов, протекающих в природно-технических системах (ПТС), осуществить интеллектуальный анализ слабоструктурированных данных в ходе мониторинга ключевых показателей ПТС, представленных в виде неоднородных потоков информации, содержащей, например, гидрометеорологические данные об уровне загрязнения и составе воздуха, почвы, экологического контроля, предельно допустимых выбросов вредных веществ, а так же данные о состоянии ресурсов вычислительной системы, каналов связи, используемых при обработке данных мониторинга. Представлен метод динамической кластеризации мониторируемых объектов в классе автоматных моделей, что позволило описать с использованием автоматной грамматики процессы изменения состояния объектов ПТС.

Ключевые слова: системы мониторинга, динамическая кластеризация, интеллектуальная технология, большие данные, моделирование сложных систем, интеллектуальный анализ данных.

Поступила в редакцию: 16.01.20.

Введение. Исследование антропогенной трансформации природной среды в условиях увеличивающихся масштабов и сложности природно-технических систем, обусловленных большим числом контролируемых параметров объектов этих систем с целью оценки их динамического состояния, предъявляют все более жесткие требования к системам мониторинга и контроля изменения состояния таких объектов. Настоящая работа посвящена разработке метода динамической кластеризации, используемого для оценки не только состояния объектов окружающей среды, таких, например, как экосистема акватории г. Севастополя, но и для оценки состояния объектов самой технической системы, которая используется для исследования характеристик внешней среды. К числу таких объектов, например, относятся физические ресурсы вычислительных систем. Предлагаемый в статье подход соответствует концепции приоритетной региональной программы «Умный город» в соответствии со «Стратегией социально-экономического развития г. Севастополя

до 2030 года», который основывается на Распоряжении Правительства РФ «Об утверждении Концепции построения и развития аппаратно-программного комплекса «Безопасный город» [1]. Систему «Умный город», на концептуальном уровне, можно рассматривать как масштабную киберфизическую систему, координирующую взаимодействия между разнородными физическими устройствами и вычислительными системами в реальном масштабе времени. Разнородность приложений и беспроводных коммуникаций существенно усложняет обеспечение безопасности таких систем.

При этом цели контроля могут быть разными. С одной стороны – необходимо осуществление постоянного мониторинга ключевых параметров окружающей среды и выполнение анализа тенденций их изменения с целью оперативного обеспечения принятия ответных мер по ликвидации критических событий до того, как они наступят. С другой стороны – усложнение архитектуры систем приводит к необходимости постоянного контроля эффективности использования

дорогостоящих ресурсов, отслеживание предкритических ситуаций о состоянии вычислительных ресурсов, таких как загрузка канала связи, процессора, памяти. В процессе функционирования системы особое значение приобретает контроль изменения состояния ресурсов, аварийных ситуаций, которые могут привести к неправильной работе самих вычислительных систем или к выходу из строя отдельных компонентов. Решение этих задач в большинстве случаев требует контроля десятков параметров с каждого вычислительного узла с периодом порядка единиц секунд, а в условиях высокодинамичных сред – долей секунд. Такие потоки информации с сотен, тысяч узлов современных систем требуют разработки новых подходов к организации процессов мониторинга и контроля состояния объектов. В качестве примеров природно-технических систем можно привести системы мониторинга гидрометеорологической информации, данных об уровне загрязнения и составе воздуха, почвы, экологического контроля аномалий и предельно допустимых выбросов вредных веществ и др. [2, 3]. В числе других примеров можно назвать информационные вычислительные комплексы, обеспечивающие безопасность объектов критической информационной инфраструктуры «Умный город», интеллектуальные системы управления беспилотными воздушными и наземными транспортными средствами, системы обеспечивающие межмашинное взаимодействие с использованием технологии интернет вещей и др. [4, 5].

Таким образом, наблюдается общность подходов к решению задач обнаружения аномальных данных при мониторинге состояния объектов окружающей среды и контроле состояния физических ресурсов вычислительных систем. И в том и другом случае важно обнаруживать моменты изменения состояния контролируемых объектов. При этом скорость и достоверность оценки ситуации может иметь решающее значение. В условиях дефицита априорной информации большая часть проблем анализа данных связана с исследованиями стохастических систем, в которых обнаружение

существенных, но редких информационных ситуаций часто имеет первостепенное значение [6].

При решении поставленных задач возникают проблемы обработки больших данных: высокая вычислительная сложность, обусловленная обработкой огромных объемов данных; высокая динамика контролируемых объектов; дефицит априорной информации о контролируемых объектах; нестационарность информационной ситуации состояния объектов и внешней среды; обеспечение высокой скорости обработки запросов; предоставление метрик информационных ресурсов в реальном времени [7–10]. Поэтому для разрешения указанных проблем предлагается использовать подход, основанный на оценке информационного состояния контролируемых объектов и отнесения их к заданному кластеру. Предлагаемые решения имеют отличительные особенности, которые состоят в использовании: малых объемов выборок при проведении измерений метрик объектов контроля; методов, обладающих низкой трудоемкостью и высоким быстродействием; критериев для оценки информационных ситуаций изменения состояния объектов. Поэтому разработка интеллектуальных методов для оценивания состояний природно-технических систем является актуальной задачей, имеющей научную новизну и практический интерес.

Постановка задачи. Целью работы является разработка метода динамической кластеризации оценивания состояний объектов ПТС на основе автоматной модели для повышения быстродействия и уровня достоверности методов классификации информационных ситуаций, возникающих при выполнении контроля характеристик объектов ПТС. Предлагается в качестве информационной меры использовать расстояние Кульбака [11]. Основными преимуществами предлагаемого метода оценки состояния объектов на основе информационной меры Кульбака являются: чувствительность к изменениям состояния объектов и адаптивность к внешним воздействиям.

При достаточно общей постановке задачи речь идет о необходимости выполнения кластеризации результатов наблюдений над состоянием объектов, входящих в ПТС. Обозначим

$O = \{O_1, \dots, O_j, \dots, O_m\}$ – множество контролируемых объектов ПТС.

Определим контролируемые характеристики объектов, по которым будем оценивать их состояние:

D_j – значение характеристики j -го объекта, векторная величина с компонентами элементов множеств O_j ,

V_j – скорость изменения значения D_j , векторная величина с компонентами элементов множеств O_j , где $V = \Delta V / \Delta t$,

$\Delta V = D(t_i) - D(t_{i-1})$, изменение значения D_j за время Δt ,

$\Delta t = t_i - t_{i-1}$ – промежуток между двумя соседними моментами времени,

t_i – i -ый момент времени измерения характеристик, $t_i \in [0; T]$.

Значения характеристик D_j , V_j нормированы, определены в диапазоне $[0; 1]$ и соответствуют долям значений D_j и V_j , соответственно, в момент времени t_i . Структуры $\{D, V\}$ являются векторными матричными функциями операционных моментов времени принятия решений,

т.е. при фиксированном t_i образуют числовые матрицы.

Будем полагать, что состояние объекта O_j в заданный момент времени t зависит от значений контролируемых характеристик D_j , V_j . Пусть эти состояния обозначены $S_j^t = \{S_{j0}^t, S_{j1}^t, S_{j2}^t, S_{j3}^t\}$ – множество возможных состояний объекта O_j в момент времени t . Значения состояний определены и нормированы в диапазоне $[0; 1]$. Пусть состояния определены на интервалах $[R_k; R_{k+1}]$, где R_k – порог для задания области определения состояния объекта, $k=0, 2$. Без потери общности для примера будем полагать, что мы имеем четыре интервала, на которых определяются возможные состояния S_j^t :

$$S_{j0}^t \in [0; R_0],$$

$$S_{j1}^t \in (R_0; R_1],$$

$$S_{j2}^t \in (R_1; R_2],$$

$$S_{j3}^t \in [R_2; 1].$$

Рассмотрим для примера в пространстве координат OD_j, V_j области состояния S_j^t объекта O_j по значениям (D_j, V_j) . Отобразим точку с координатами (D_j, V_j) на плоскости (рис.1), на которой выделены четыре области значений, соответствующие состояниям S_j^t объекта O_j :

Рис. 1. Области $\{0, 1, 2, 3\}$ различия состояний S_j^t в пространстве параметров D_j, V_j , где D_j – значение характеристики j -го объекта, V_j – скорость изменения значения D_j

Fig. 1. Areas of $\{0, 1, 2, 3\}$ differences in the states S_j^t in the parameter space D_j, V_j , where D_j – is the value of the characteristic of the j -th object, V_j – is the rate of change of the value of D_j

Для примера области разделены прямыми, хотя в реальных условиях это могут быть кривые линии, форма которых определяется экспертом для конкретных условий различия состояний объектов. Обозначим множество этих состояний $\{0,1,2,3\}$. Не нарушая общности описания, предположим, что область с номером «0» обозначает нормальное состояние, а область с номером «3» – критиче-

ское состояние. Области «1» и «2» соответствуют некоторым промежуточным состояниям: пусть область «2» ближе к критической области «3», а область «1» – к нормальному состоянию – «0».

Методы и результаты. Будем фиксировать изменения состояния объекта S_j^t на временном интервале Tr ($r=1,2,\dots,N$) в моменты времени $[t_1, t_2, t_3]$ (рис. 2).

Рис. 2. Моменты времени t_1, t_2, t_3 фиксации состояния объектов ПТС на макро интервалах $T1, T2 \dots TN$

Fig. 2. Time instants t_1, t_2, t_3 of fixing the state of PTS objects at macro intervals $T1, T2 \dots TN$

Для оценки динамических состояний объектов предлагается использовать автоматную модель. Как известно, конечный автомат является мощным средством построения общесистемных описаний [12]. С этой целью построим автомат Мили, для которого задано:

- S_n – начальное состояние,
- множество входных состояний $S \in \{0,1,2,3\}$, определяемые текущей парой значений характеристик (D_j, V_j) ,
- множество выходных состояний Y_j , $j=1,m$, где m – число состояний автомата.
- множество внутренних состояний $S_j^t \in \{0,1,2,3\}$,
- функция выходов $Y_j = \varphi(S_j^t, (D_j, V_j))$,
- функция переходов $S^{t+1}_j = \psi(S_j^t, (D_j, V_j))$.

Работу автомата будем рассматривать применительно к конкретным тактам времени t_1, t_2, t_3 , так как каждому такту t_i будет соответствовать свой выходной сигнал $Y(t_i)$. В начальный момент времени t_0 автомат находится в состоянии S_n . В каждый момент времени t_i автомат находится в одном из внутренних

состояний, способен принимать входной сигнал, формировать новое внутреннее состояние и выдавать соответствующий выходной сигнал.

Рассмотрим процесс построения таблиц переходов и выходов автомата Мили на основе графа переходов. На графе будем отображать возможные переходы между внутренними состояниями автомата и выходные состояния, а в качестве входных сигналов будем использовать состояния объекта в текущий момент времени. Для определенности будем рассматривать переходы в течение трех последовательных тактов t_1, t_2, t_3 , для каждого из которых на дугах отмечаются состояния объекта, определяемые значениями пары характеристик (D_j, V_j) , и выходной сигнал Y_j , вырабатываемый автоматом на переходе из состояния S_j^t в состояние S^{t+1}_j . Процесс переходов между внутренними состояниями вершин графа под воздействием входных сигналов изображен на рис. 3. Первоначально автомат находится в начальном состоянии – S_n .

Рис. 3. Граф переходов состояний автомата Мили, отображающий процесс изменения состояний объекта ПТС

Fig. 3. The state transition graph of the Miles automaton, which displays the process of changing the state of a TCP object

В момент времени t_1 приходит сигнал о состоянии $S \in \{0,1,2,3\}$, который переводит автомат в одно из возможных состояний $\{S_0, S_1, S_2, S_3\}$. На соответствующей дуге отмечаем значение входного и выходного сигнала, например, $0/Y_0$ на крайней левой дуге. Автомат переходит в состояние S_0 . Затем с учетом текущего внутреннего состояния S_0 и входного сигнала, поступающего в момент времени t_2 формируется новое внутреннее состояние и выходной сигнал Y_j . Пусть для примера поступил сигнал $S=0$. Тогда на крайней левой дуге отмечаем $00/Y_3$ и автомат переходит в новое состояние S_{00} . Если же текущим входным сигналом окажется $S=3$, который соответствует критическому состоянию ресурсов, автомат перейдет в аварийное состояние, обозначенное *Reset*. В этом состоянии запускается процедура тестирования ресурсов – *test* с целью проверки правильности работы измерительных датчиков. По окончании процедуры тестирования автомат переходит в состояние *СППР* – «система поддержки принятия решений», в котором ЛПР принимает решения по анализу сложившейся ситуации, выбору стратегий контроля состояния объектов, сценариев реализации этой

стратегии в зависимости от типа текущего контроля и его параметров, а также вектора вероятностей выбора стратегии контроля, учитывающего возможные потери. После принятия решения автомат переходит в начальное состояние – S_H .

Построим систему правил переходов состояний автомата с учетом логики алгоритма, представленной на графе рис.2. Обозначим символом x_i входной сигнал S о состоянии объекта, поступивший в момент времени t_i , $i \in \{1,2,3\}$, $x_i \in \{0,1,2,3\}$. Введем обозначение $S_{x_1x_2x_3}$ для последовательности изменения внутреннего состояния автомата за три такта. Например, значение $S_{x_1x_2x_3}=S_{00}$ означает, что внутреннее состояние автомата, соответствующее нормальному состоянию объекта за два такта не изменилось, так как $x_1=0$, $x_2=0$.

Ниже представлены правила переходов состояний автомата. Во всех правилах используются выше принятые обозначения.

Правила уровня «0» в соответствии с иерархией вершин на графе переходов, соответствующие первому такту в момент времени t_1 , определяются таким образом:

$$S_n \rightarrow S_{x1} \in \{S_0, S_1, S_2, Reset\}. \quad (1)$$

Выражение (1) содержит три правила перехода из начальной вершины в состояния S_0, S_1, S_2 и один переход в аварийное состояние:

$$\begin{aligned} S_n &\rightarrow S_0, \\ S_n &\rightarrow S_1, \\ S_n &\rightarrow S_2, \\ S_n &\rightarrow Reset \end{aligned}$$

Правила уровня «1» в соответствии с иерархией вершин на графе переходов, соответствующие второму такту в момент времени t_2 , определяются так:

$$\begin{aligned} S_{x1} &\rightarrow S_{x1x2} \in \\ &\in \{S_{00}, S_{01}, S_{02}, \dots, S_{20}, S_{21}, S_{22}, Reset\} \end{aligned} \quad (2)$$

Выражение (2) содержит девять правил переходов из вершин S_{x1} в состояния S_{x1x2} и три правила перехода в аварийное состояние:

$$\begin{aligned} S_0 &\rightarrow S_{0x2}, \\ S_1 &\rightarrow S_{1x2}, \\ S_2 &\rightarrow S_{2x2}, \\ S_3 &\rightarrow Reset \end{aligned}$$

Правила уровня «2» в соответствии с иерархией вершин на графе переходов, соответствующие третьему такту в момент времени t_3 , определяются следующим образом:

$$S_{x1x2} \rightarrow S_{x1x2x3} \in \{S_{000}, S_{001}, S_{002}, \dots, S_{220}, S_{221}, S_{222}, Reset\} \quad (3)$$

Каждое из выражений (4), (5), (6) содержит три группы правил, каждая из которых, в свою очередь, содержит три правила:

$$S_{0x2} \rightarrow S_{0x2x3}: \quad (4)$$

$$\begin{aligned} S_{00} &\rightarrow S_{00x3}, \\ S_{01} &\rightarrow S_{01x3}, \\ S_{02} &\rightarrow S_{02x3}, \\ S_{1x2} &\rightarrow S_{1x2x3}: \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} S_{1x2} &\rightarrow S_{10x3}, \\ S_{1x2} &\rightarrow S_{11x3}, \\ S_{1x2} &\rightarrow S_{12x3}, \\ S_{2x2} &\rightarrow S_{2x2x3}: \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} S_{2x2} &\rightarrow S_{20x3}, \\ S_{2x2} &\rightarrow S_{21x3}, \\ S_{2x2} &\rightarrow S_{22x3}, \end{aligned}$$

Таким образом, для предложенного способа различия состояний объектов (4 состояния) построенная система правил переходов включает 39 правил переходов во внутренние состояния автомата, а также 13 правил перехода в аварийное состояние *Reset*. Каждое из внутренних состояний по истечении третьего такта содержит последовательность изменения состояния объекта. Поскольку код выходного состояния автомата формируется за три такта, то число выходных состояний составит 28. Поэтому для кодирования внутренних состояний автомата потребуется 6 двоичных разрядов, а для представления выходных состояний – 5 разрядов. Аналогичным образом строится граф выходных состояний.

Построение автоматной грамматики. Автоматная грамматика соответствует правилам (1–6) перехода и включает:

$$G = \{V_T, V_H, P, S_n, e\}, \quad (7)$$

где V_T – множество терминальных символов, V_H – множество нетерминальных символов, P – множество продукций, S_n – начальное состояние, S – внутреннее состояние, e – пустой символ.

$$\begin{aligned} V_T &= \{0, 1, 2, reset, e\}, \\ V_H &= \{S_n, S\}, \\ P &= \{S_n \rightarrow S; S \rightarrow e; S \rightarrow 0S; S \rightarrow 1S; \\ &S \rightarrow 2S; S \rightarrow reset; reset \rightarrow e\}. \end{aligned}$$

Начальному символу грамматики сопоставляется начальное состояние автомата – S_n .

Алфавиту нетерминальных символов V_H – алфавит внутренних состояний и начальная вершина. Алфавиту терминальных символов V_T – алфавит кодов внутренних состояний и пустая вершина. Операции $S \xrightarrow{e}$ соответствует конечная вершина автомата. Правилам грамматики соответствует функция переходов автомата $S^{t+1} = \psi(S^t, (Dj, Vj))$. Представленная грамматика является правосторонней. В табл. 1 представлен фрагмент таблицы переходов автомата Мили.

Таблица 1. Переходы автомата Мили в соответствии с автоматной грамматики

S		$S_{нач}$	S_0	S_1	S_2	S_{00}	...	S_{22}
$S(D_j, V_j)$								
t_{i+1}	t_{i+2}	t_i	t_{i+1}	t_{i+1}	t_{i+1}	t_{i+2}		t_{i+2}
0	-	Y_0	Y_3	Y_6	Y_9	Y_{12}	...	Y_{36}
1	-	Y_1	Y_4	Y_7	Y_{10}	Y_{13}	...	Y_{37}
2	-	Y_2	Y_5	Y_8	Y_{11}	Y_{14}	...	Y_{38}
3	-	Reset	Reset	Reset	Reset	Reset	...	Reset
0	0	Y_3	Y_{12}	Y_{21}	Y_{30}	-	-	-
....								
2	2	Y_{11}	Y_{20}	Y_{29}	Y_{38}	-	-	-
2	3	Reset	Reset	Reset	Reset	Reset	...	Reset

В табл. 2 представлен фрагмент таблицы выходов автомата Мили.

Таблица 2. Выходы автомата Мили в соответствии с автоматной грамматики

S_i		$S_{нач}$	S_0	S_1	S_2	S_{00}	...	S_{22}
$S(D_j, V_j)$								
t_{i+1}	t_{i+2}	t_i	t_{i+1}	t_{i+1}	t_{i+1}	t_{i+2}		t_{i+2}
0	-	S_0	S_{00}	S_{10}	S_{20}	S_{000}	...	S_{220}
1	-	S_1	S_{01}	S_{11}	S_{21}	S_{001}	...	S_{221}
2	-	S_2	S_{02}	S_{12}	S_{22}	S_{002}	...	S_{222}
3	-	Reset	Reset	Reset	Reset	Reset	...	Reset
0	0	S_{00}	S_{000}	S_{100}	S_{200}	-	-	-
....								
2	2	S_{22}	S_{022}	S_{122}	S_{222}	-	-	-
2	3	Reset	Reset	Reset	Reset	Reset	...	Reset

Совокупность табл. 1 и 2 исчерпывающе описывают функционирование автомата. Смоделируем работу автомата на заданную входную последовательность x_1, x_2, x_3 . Информацию о смене состояний и выходных сигналах будем представлять в таблице, содержащей четыре строки обозначенными: «Такты», «X», «S», «Y». Во второй строке указывается собственно входная последовательность X , в третьей строке – последова-

тельность состояний автомата S , а в четвертой – выходная последовательность Y . Столбцы соответствуют тактам работы автомата.

Построим реакцию автомата на входное воздействие «0-1-2», которое представляет собой смену состояний объекта. Начальное состояние автомата: $S_{н}$. Таблица работы автомата будет выглядеть так

Таблица 3. Формирование выходной последовательности автомата Мили для входных воздействий $\{0, 1, 2\}$

Такты	t_0	t_1	t_2	t_3	
X	x_H	$x_1 = 0$	$x_2 = 1$	$x_3 = 2$	e
S	S_H	S_0	S_{01}	S_{012}	конец
Y	-	Y_0	Y_4	Y_{17}	

В начальный момент времени в столбце t_0 указываем x_H и S_H в соответствующих строках. Выходной сигнал в начальном состоянии не вырабатывается. Далее в первом такте поступает сигнал $x_1=0$. Автомат переходит в состояние S_0 и вырабатывается выходной сигнал Y_0 . Остальные элементы третьей и четвертой строки формируются по тактам t_2 и t_3 . Соответственно формируются внутренние состояния S_{01} , S_{012} и выходные – Y_4 , Y_{17} . Заканчивается формирование внутреннего состояния и выходного сигнала поступлением пустого сигнала e .

Таким образом, за время действия автомата на каждом временном интервале $Tr [T_1; T_N]$ ($r=1,2,\dots,N$) в моменты времени t_1, t_2, t_3 формируются выходные сигналы и внутренние состояния S_{x1x2x3} , которые фиксируют динамику изменения состояния объекта, а именно переходы между состояниями S_{x0}, S_{x1}, S_{x2} . Эти состояния будем использовать для формирования следующих кластеров (по значениям характеристик D и V): кластеры состояний объектов – DK_{x1x2x3} и кластеры – VK_{x1x2x3} , характеризующие скорость изменения состояний объектов. Определим состояние кластера на основе состояний объектов, которые его формируют. В кластер DK_{x1x2x3} входят следующие множества состояний:

$$DK_{x1x2x3} = \{ DK_0, DK_1, DK_2, DK_{01}, DK_{02}, DK_{12}, DK_{012} \},$$

где DK_0 – состояние $S_0 = const$ в каждом такте ($x1=x2=x3=0$),

DK_1 – состояние $S_1 = const$ в каждом такте ($x1=x2=x3=1$),

DK_2 – состояние $S_2 = const$ в каждом такте, ($x1=x2=x3=2$),

$DK_{01} - S_{x1x2x3} \in DK_{01}$, если $x1, x2, x3 \in \{0,1\}$, состояния близкие к нормальному,

$DK_{02} - S_{x1x2x3} \in DK_{02}$, если $x1, x2, x3 \in \{0,2\}$, кластер резких переходов,

$DK_{12} - S_{x1x2x3} \in DK_{12}$, если $x1, x2, x3 \in \{1, 2\}$, состоянию близкие к предкритическому,

$DK_{012} - S_{x1x2x3} \in DK_{012}$, если $x1, x2, x3 \in \{0,1,2\}$, кластер неустойчивых состояний.

На основе описанных множеств состояний объектов формируются указанные множества кластеров и определяется их мощность $|DK_{x1x2x3}|$. Аналогично могут быть построены кластеры состояний на следующем временном интервале $[T_{N+1}; T_{2N}]$. На рис. 4 представлены состояния кластеров DK_{x1x2x3} , полученные в результате моделирования на двух соседних интервалах T_N и T_{2N} . Причем на интервале T_{2N} в поток данных были внесены возмущения [10], которые привели к увеличению предкритических, неустойчивых состояний и уменьшению числа нормальных состояний.

Рис. 4. Динамика состояний кластеров DK_{x1x2x3} , полученная в результате моделирования на временных интервалах T_N и T_{2N} с указанием мощности кластеров

Fig. 4. The dynamics of the state of clusters DK_{x1x2x3} , obtained as a result of modeling at time intervals T_N and T_{2N} with the indication of cluster power

Аналогичные кластеры могут быть построены по характеристике $VK_{x_1x_2x_3}$, которая отражает скорость изменения состояний объектов.

С учетом изложенного, общий алгоритм динамической кластеризации содержит следующую последовательность действий:

- проводится мониторинг за совокупностью исследуемых объектов путем фиксации признаков этих объектов на интервале $[T_1; T_N]$,

- в моменты времени t_1, t_2, t_3 формируется последовательность внутренних состояний $S_{x_1x_2x_3}$ на основе автоматной модели,

- состояния $S_{x_1x_2x_3}$ используются для построения кластерной структуры. При этом начальное число кластеров подбирается итеративно или задается из каких-либо априорных соображений. Степень различия состояний $S_{x_1x_2x_3}$ по значениям комбинаций $x_1x_2x_3$ определяется ЛПР и зависит от требований к качеству, быстродействию, достоверности контроля,

- описанные выше действия повторяются на интервале $[T_{N+1}; T_{2N}]$, осуществляется проверка динамических изменений кластерной структуры (появление новых/исчезновение/слияние/расщепление кластеров. При необходимости проводится коррекция структуры кластеров в соответствии с выявленными изменениями.

Предложенный алгоритм основан на использовании непараметрических методов оценки состояний объектов ПТС, их классификации и формирования динамической кластерной структуры на базе автоматной модели Мили. После выявления изменений и соответствующей коррекции состояния текущей кластерной структуры может выполняться прогнозирование состояния экосистемы.

Заключение. Разработка интеллектуальной технологии на основе оценивания состояний природно-технических систем, базирующейся на автоматной модели динамической кластеризации,

приведет к повышению обоснованности, достоверности и оперативности процессов поддержки принятия решений при исследовании антропогенной трансформации природной среды, а также при решении задач обеспечения безопасности объектов критической информационной инфраструктуры «Умный город». Практическая значимость результатов работы приведёт к снижению уровня негативного воздействия природных и антропогенных факторов, в частности, на состояние экосистем акватории г. Севастополя.

Работа выполнена при частичной поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 19-29-06015/19, 19-29-06023/19).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Об утверждении Концепции построения и развития АПК «Безопасный город», утв. Распоряжением Правительства Российской Федерации 03.12.2014, № 2446-р. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://14.mchs.gov.ru/document/2632303> (дата обращения: 23.12.2019).
2. *Аэрокосмический мониторинг объектов нефтегазового комплекса* / под ред. акад. В.Г. Бондура. М.: Научный мир, 2012. 558 с.
3. *Гайский В.А., Гайский П.В.* Многомерный гармонический анализ фурье при измерениях полей морской среды // Системы контроля окружающей среды. 2019. Вып. 4 (38). С. 33–42.
4. *Зегжда П.Д.* Систематизация киберфизических систем и оценка их безопасности / П.Д. Зегжда, М.А. Полтавцева, Д.С. Лаврова // Проблемы информационной безопасности. Компьютерные системы. 2017. № 2. С. 127–138.
5. *Добрынин Д.А.* Беспилотные транспортные средства, современное состояние и перспективы // Четырнадцатая национальная конф. по искусствен-

ному интеллекту с междунар. участием КИИ-2014 (г. Казань, 24–27 сентября 2014 г.): тр. конф.: в 3 т. Т. 3. М.: Физматлитгиз, 2014. С. 265–274.

6. *Ширяев А.Н.* Вероятностно-статистические методы в теории принятия решений. 2-изд., новое. М.: МЦНМО, 2014. 144 с.

7. *Информационные технологии для критических инфраструктур: монография / под ред. А.В. Скаткова.* Севастополь: СевНТУ, 2012. 306 с.

8. *Скатков А.В., Брюховецкий А.А., Моисеев Д.В.* Интеллектуальная система мониторинга для решения крупномасштабных научных задач в облачных вычислительных средах // Информационно-управляющие системы. Спб.: Изд-во «ГУАП», 2017. № 2 (87). С. 19–25.

9. *Skatkov A., Brykhovetskiy A., Moiseev D.* Detecting changes simulation of the technological objects' information states // MATEC Web of Conferences. Vol. 224, 2018. 02072 (ICMTMTE 2018). <https://doi.org/10.1051/matecconf/201822402072>

10. *Брюховецкий А.А., Скатков А.В., Шишкин Ю.Е.* Моделирование процессов обнаружения аномалий в сложно-структурированных данных мониторинга // Системы контроля окружающей среды. 2017. Вып. 3 (29). С. 45–49.

11. *Кульбак С.* Теория информации и статистика. М.: Наука, 1967. 408 с.

12. *Поспелов Д.А., Пушкин В.Н.* Мышление и автоматы. М.: Сов. Радио, 1972. 244 с.

DYNAMIC CLUSTERING FOR ASSESSING THE STATES OF NATURAL TECHNICAL SYSTEMS

A.V. Skatkov, A.A. Bryukhovetsky, D.V. Moiseev, V.I. Shevchenko

Sevastopol State University,
RF, Sevastopol, Universitetskaya St., 33

The main features associated with the development and study of methods of intelligent technology for assessing the state of natural-technical systems are considered. The proposed approach will allow us to create a basis for modeling processes occurring in natural-technical systems (NTS), to carry out an intelligent analysis of poorly structured data during monitoring of key NTS indicators, presented in the form of heterogeneous information flows containing, for example, hydrometeorological data on the level of pollution and composition of air, soil, environmental control, monitoring of maximum permissible emissions of harmful substances, as well as data on the status of resources computer system, communication channels used in the processing of monitoring data. The method of dynamic clustering of monitored objects in the class of automaton models is presented, which made it possible to describe processes of changing the state of NTS objects using automatic grammar.

Keywords: monitoring systems, dynamic clustering, intelligent technology, big data, modeling of complex systems, data mining.