

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ СЦЕНАРИЕВ, ПОЛУЧЕННЫХ В РЕЗУЛЬТАТЕ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

И. В. Чернов

Институт проблем управления им. В. А. Трапезникова РАН, г. Москва

✉ chernov@ipu.ru

Аннотация. Исследуются проблемы повышения эффективности применения сценарного подхода в процессах планирования и управления развитием социально-экономических систем в условиях неопределенности. Разрабатываются методы оценки эффективности сценарного управления, основанные на кодировке сценариев, а затем и их сравнения с целевым сценарием. Для сравнения сценариев разрабатывается алгоритм формализованного их представления в виде последовательности идентификаторов уникальных событий. Разработаны методы оценки, основанные: на событийном сходстве сценариев; сходстве, учитывающем операции над последовательностью событий; сходстве событий по составляющим их качественным параметрам поведения значимых факторов. Важной особенностью сценарного управления является то, что цель формулируется не только как конечное состояние системы, а в виде последовательности событий, составляющих целевой сценарий. Для оценки эффективности вариантов управления и связанных с ними полученных сценариев используется целевой сценарий (эталон), в сравнении с которым будет оцениваться результат сценарного моделирования и связанного с ним управления. Поскольку назначением сценарного исследования является поддержка управления мероприятием, приводящего к поставленной цели, то целесообразно в качестве подобного эталона также использовать сценарий, наиболее рациональный по ряду характеристик, значения которых являются целевыми для проводимого мероприятия. В целях кодирования событий сценариев предложено использовать ранее разработанный сценарно-событийный подход, позволяющий осуществить переход от вещественного фазового пространства, отражающего изменения значений факторов сценарной имитационной модели, к событийному пространству. Приведены примеры практического применения разработанных подходов к оценке эффективности сценариев при решении ряда прикладных задач управления обеспечением устойчивого и безопасного развития сложных социально-экономических систем.

Ключевые слова: сценарная модель, сценарий, управление, эффективность, фактор, событие, имитационное моделирование, оценка, мера близости, мера связности.

ВВЕДЕНИЕ

При решении прикладных задач планирования и управления развитием сложных систем, а также интеллектуальной поддержки процессов подготовки и реализации управленческих решений требуется четкая математическая формализация, обеспечивающая построение систем, позволяющих изучать различные аспекты развития ситуаций на основе генерации альтернативных сценариев разви-

тия обстановки или поведения разного рода сложных объектов.

Методологической основой технологии сценарного анализа в данной работе является математическая модель ориентированных графов, являющаяся расширением классической графовой модели.

Под функциональным графом (ф-графом) будем понимать кортеж $\langle (X, E), V, W \rangle$ [1], где:

1. $G = (X, E)$ – ориентированный граф;

2. $V: X \rightarrow \mathbb{R}$ или $V = \{V_x, x \in X\}$ – множество параметров вершин, причем каждой вершине $x \in X$ ставится в соответствие некоторый вещественный параметр V_x ; \mathbb{R} – пространство вещественных чисел;

3. $W: E \times V \rightarrow \mathbb{R}$ или $W = \{W_e: V \rightarrow \mathbb{R}, e \in E\}$ – множество весов дуг. Каждой дуге $e_{ij} \in E$, соединяющей вершины v_i и v_j , ставится в соответствие функциональная зависимость.

Частные случаи функций, отражающих веса дуг графовых моделей, приведены в табл. 1.

Множество факторов V сценарной модели формируется, как было показано в работе [1], на основе расширенного фазового пространства Z эндогенных и экзогенных переменных.

Пусть в основе определения событий лежат изменения в динамике поведения множества значимых для анализа ситуации и управления факторов:

$$V^{(\text{зн})} \subseteq V = \{v_n\}, n = 1, 2, \dots, N,$$

где N – количество факторов сценарной модели.

Как было показано в работе [2], в представлении результатов моделирования возможен автоматический анализ полученных результатов моделирования на заданных временных интервалах путем выделения на этих интервалах двух множеств (локальных минимумов и локальных максимумов), построения соответствующих линий регрессий и определения углов их наклона ($\alpha^{\min}, \alpha^{\max}$) относительно оси шагов моделирования (рис. 1).

Таблица 1

Частные случаи графовых моделей

Наименование	Формализованное представление
Знаковый орграф	$F(v_i, v_j, e_{ij}) = \begin{cases} +1, & \text{если рост (падение) } v_i \\ & \text{вызывает рост (падение) } v_j, \\ -1, & \text{если рост (падение) } v_i \\ & \text{вызывает падение (рост) } v_j \end{cases}$
Взвешенный орграф	$F(v_i, v_j, e_{ij}) = \begin{cases} +W_{i,j}, & \text{если рост (падение) } v_i \\ & \text{вызывает рост (падение) } v_j, \\ -W_{i,j}, & \text{если рост (падение) } v_i \\ & \text{вызывает падение (рост) } v_j, \end{cases}$ <p>где W_{ij} – вес дуги e_{ij}</p>
Функциональный орграф	$F(v_i, v_j, e_{ij}) = f_{ij}(v_i, v_j, \dots)$

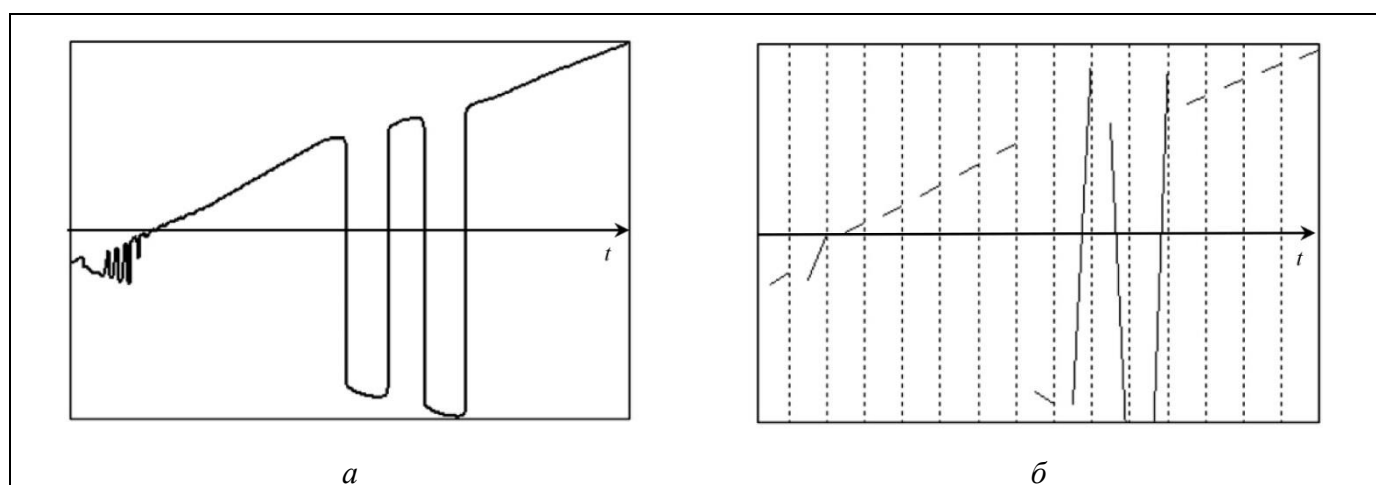


Рис. 1. Пример построения линий регрессий результата моделирования одного из факторов сценарной модели: a – результат моделирования; b – линии регрессии

Также в работе [2] показано, что в результате такого анализа осуществляется переход от вещественного пространства изменения факторов сценарной модели к ф-сценарному $FSc(v_i, t)$, которое характеризуется шестью типами состояниями (динамик) факторов (табл. 2).

В табл. 2 приведено базовое множество динамик факторов. Данное множество может расширяться, во-первых, на основе комбинации базовых динамик; во-вторых, существует возможность формирования новых динамик на основе полученных в результате анализа характеристик графиков изменения факторов (например, на основе значений углов наклона).

Таким образом, по сути осуществляется переход к дискретному пространству состояний, в котором описывается изменение факторов, т. е. имеем для каждого значимого фактора конечное множество дискретных состояний, которые могут изменяться в дискретные моменты времени, заданные шагом моделирования и правилами расчета ф-сценариев.

1. КОДИРОВАНИЕ СЦЕНАРИЕВ

Учитывая вышеизложенное, экспертно-значимое событие на i -м шаге t_i является функцией от динамик поведения значимых для формирования этих событий факторов:

$$E^{(3H)}(t_i) = f(FSc(v_n, t_i)), v_n \in V^{(3H)}, \\ n = 1, 2, \dots, N, i = 1, 2, 3 \dots$$

Самый простой вид этой функции – «склейка» всех значений $FSc(v_n, t_i)$. Например, если $V^{(3H)} = \{v_3, v_5, v_9, v_{12}\}$ и $FSc(v_3, t_i) = 1$, $FSc(v_5, t_i) = 3$, $FSc(v_9, t_i) = 2$, $FSc(v_{12}, t_i) = 1$ при количестве факторов сценарной модели $N = 12$, то может быть два варианта такой «склейки»:

- $E^{(3H)}(t_i) = "1321"$ – сокращенная запись, если не меняется во времени состав значимых факторов $V^{(3H)}$;
- $E^{(3H)}(t_i) = "--1-3---2--1"$ – полная запись, если состав значимых факторов может меняться, $V^{(3H)}(t)$.

Рассмотрим случай, когда формирование нового события происходит, если меняется тип динамики любого из множества значимых факторов. Таким образом, можно записать оператор $create(Ev_e(t_n, t_n + P))$, создающий новое событие на интервале шагов моделирования от t_n до $t_n + P$:

$$create(Ev_e(t_n, t_n + P)), e = 1,$$

$$\{v_i\} \in V^{(3H)}, i = 1, 2, \dots, N,$$

$$FSc(v_i, P) = 0, i = \overline{1, n}, \text{ если } t_n = 0.$$

$$t_n = t_n + P, create(Ev_e(t_n, t_n + P)), e = e + 1,$$

$$\text{если } \exists FSc(v_i, t_n + P) \neq FSc(v_i, t_n).$$

Таблица 2

Идентификаторы динамик факторов

Значение ф-сценария $FSc(v_i, t)$	Обозначение	Тип динамики i -го фактора	Название по умолчанию
0		Не определен (не рассчитывается)	Не определено
1		Рост	Растет
2		Падение	Уменьшается
3		Постоянно	Постоянно
4		Колебания, ограниченные по амплитуде	Устойчивое состояние
5		Расходящиеся колебания	Нестабильно
6		Сходящиеся колебания	Стабилизируется



Пусть сценарий задается только последовательностью событий, что соответствует наиболее часто встречающемуся случаю.

Тогда постановка задачи определения близости полученного в результате сценарного исследования сценария и целевого сценария выглядит следующим образом.

Начальные условия. На множестве сценариев определены два сценария (или фрагменты двух сценариев) – целевой сценарий \mathfrak{X}^0 и один из множества полученных при различных условиях сценариев $\mathfrak{X}^j \in \tilde{\mathfrak{X}} = \{\mathfrak{X}^j\}, j = 1, 2, \dots, N^{\mathfrak{R}}$, на одном и том же временном интервале длительностью t_r на момент времени t – как конечные последовательности упорядоченных событий $E^{(\text{зн})j}$, сформированных по правилу $C^{(\text{зн})}$ на одном и том же фазовом пространстве:

– целевой сценарий:

$$\mathfrak{X}^0(t) = \mathfrak{X} \left\{ E^{(\text{зн})0}(t_i) = f(Z^{\text{(тар)}}(t)), (t - t_r) < t_i \leq t \right\};$$

– j -й сценарий из множества полученных сценариев:

$$\mathfrak{X}^j(t) = \mathfrak{X} \left\{ E^{(\text{зн})j}(t_i) = f(Z(t)), (t - t_r) < t_i \leq t \right\}.$$

Здесь $Z(t)$ – состояние фазового пространства в момент времени t , а $Z^{\text{(тар)}}(t) \subset Z(t)$ – заданное целевое подпространство.

Задача: определить меру близости (сходства) сценариев как меру сходства последовательностей событий.

Обозначим первое событие сценария $\mathfrak{X}^j(t)$, полученного на шаге t на рассматриваемом интервале, как

$$E^{(\text{зн})j}(1) = E^{(\text{зн})j}(t - t_r + 1).$$

Таким образом, рассматривается сходство конечных последовательностей событий сценариев $\mathfrak{X}^j(t) = \{E^{(\text{зн})j}(1), E^{(\text{зн})j}(2), \dots, E^{(\text{зн})j}(K)\}$ как объектов, представляющих упорядоченные наборы из $K = t_r$ элементов $E^{(\text{зн})j}(k)$ некоторого множества событий $\tilde{E}^{(\text{зн})}$, где k – номер позиции события на горизонте сценария t_r (относительный номер шага моделирования), $k = \overline{1, K}$.

Пусть $\tilde{\mathfrak{X}}^+ = \mathfrak{X}^0 \cup \tilde{\mathfrak{X}}$ – множество всех сценариев (целевого и полученных), причем целевой сценарий находится в начале множества и рассматри-

вается первым. Для пособытийного сравнения сценариев необходимо каждому событию из множества $\tilde{E}^{(\text{зн})}$ сопоставить целое число $TEv^{(\text{зн})}$, которое соответствует типу события, который служит идентификатором события и позволяет однозначно отличить его от остальных не совпадающих с ним событий множества $\tilde{E}^{(\text{зн})}$. Таким образом можно сформировать массив AEv , который содержит уникальные события $E^{(\text{зн})}(t_i)$ всех сценариев из множества $\tilde{\mathfrak{X}}$, обнаруженных в процессе идентификации. Номер элемента массива соответствует идентификатору (типу) $TEv^{(\text{зн})}$.

Уникальные события целевого и полученных сценариев при этом располагаются в массиве по мере их обнаружения, а их идентификаторы (индексы этих событий в массиве) заносятся в представление $TEv^{(\text{зн})j}$ текущего сценария, при этом если событие уже встречалось, т. е. совпало с каким-то из уже имеющихся в массиве AEv , то ему присваивается идентификатор этого уже имеющегося события в массиве, т. е. пошагово реализуется укрупненный алгоритм, представленный на рис. 2.

На рис. 2 и далее для компактности запись $E^{(\text{зн})j}(t_i) \notin AEv$ означает, что событие $E^{(\text{зн})j}(t_i)$ не найдено среди элементов массива AEv .

Таким образом, можно представить сценарии как последовательности типов событий:

$$T\mathfrak{X}^j(k) = \left\{ TEv^{(\text{зн})j}(k) \right\}, k = 1, 2, \dots, K, \quad (1)$$

$$j = 0, 1, 2, \dots, N^{\mathfrak{R}}.$$

При этом $\forall TEv^{(\text{зн})j}(k) \in \{1, 2, \dots, |AEv|\}$, что означает переход к дискретным состояниям событий в сценариях. Количество типов определяет количество событий (сценарных состояний) моделируемой системы. Следовательно, появляется возможность в дальнейшем проводить сценарное исследование на конечном множестве дискретных состояний системы в дискретное время (в шагах моделирования).

Поскольку, как указано в работе [2], существует шесть базовых типов рассчитанных ф-сценариев и тип 0 (означает, что расчет не был произведен), т. е. $FSc(v_i, t) \in \{0, 1, 2, 3, 4, 5, 6\}$, количество возможных экспертно-значимых событий $NEv^{(\text{зн})}$ для $Nv^{(\text{зн})}$ количества событийнообразующих факторов определяется по формуле числа размещений с повторениями:

$$NEv^{(\text{зн})} = 7^{Nv^{(\text{зн})}}.$$

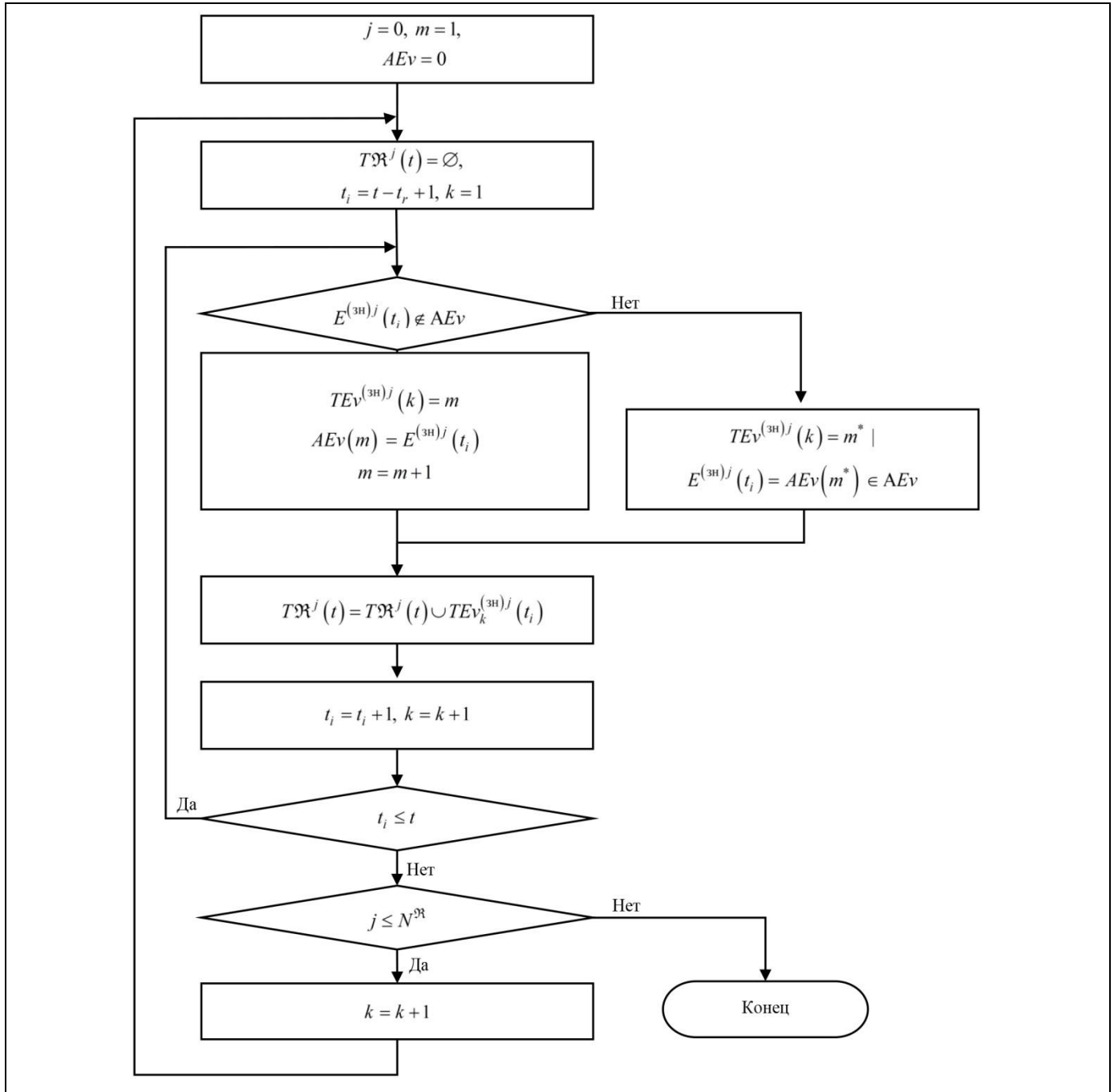


Рис. 2. Алгоритм представления целевого сценария в виде последовательности типов уникальных событий

Следует отметить, что для каждого фактора v_i каждому типу ф-сценария можно присвоить наименование или развернутое описание, которое в общем случае также зависит от t : $Name_FSc(v_i, h, t)$, где $h = 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6$. Названия по умолчанию для типов динамик указаны в табл. 2.

Число типов динамик можно расширить – например, тип 1 разделить на два типа: строгий рост ($\alpha^{\max} = \alpha^{\min}$) или рост в коридоре

($\alpha^{\max} > \alpha^{\min}$), внутри которого возможны колебания. В таком случае лингвистическая переменная, отражающая динамику фактора v_i , определяется следующим образом:

$$\{X(v_i), T_F(v_i), \theta^{\max}(v_i), \theta^{\min}(v_i), G_F(v_i), M_F(v_i)\},$$

где:

$X(v_i)$ – «Динамика фактора v_i »;

$$\theta^{\max}(v_i) = [-90, 90]; \theta^{\min}(v_i) = [-90, 90];$$



$T_F(v_i)$ – терм-множество переменной X (название лингвистических значений), по умолчанию $\forall v_i: T_F(v_i) = \{\text{«рост»}, \text{«падение»}, \text{«постоянно»}, \text{«устойчивое состояние»}, \text{«нестабильно»}, \text{«стабилизируется»}\}$ с функцией принадлежности, заданной таблично (см. табл. 2);

$G_F(v_i)$ – синтаксическое правило, порождающее новые термы с использованием квантификаторов (например, «сильно», «слабо», «более-менее» и т. п.); $M_F(v_i)$ – процедура, ставящая каждому новому терму из $G_F(v_i)$ в соответствие элемент из нечеткого множества $t_F \in T_F(v_i)$.

Например, новый терм для квантификатора «сильно + t_F » будет иметь функцию принадлежности $|\theta^{\max}(v_i)| > 60$, $|\theta^{\min}(v_i)| > 60$ и т. п.

Исходное фазовое пространство, определяемое значениями факторов $V: X \rightarrow \mathbb{R}$ или

$V = \{V_x, x \in X\}$, дополняется, а в большинстве случаев заменяется (поскольку используемый математический аппарат сценарного моделирования ориентирован на получение качественных результатов) ф-сценарным фазовым пространством дискретных состояний факторов $V^{cu}: X^{cu} \rightarrow FSc$ или

$V^{cu} = \{V_{x^{cu}}^{cu}, x^{cu} \in X^{cu}\}$. Это позволяет повысить динамическую гибкость сценарных моделей (использовать результаты в функциях элементов структуры) и автоматически генерировать сценарии в текстовом виде. Результаты сценарного моделирования могут передаваться другим системам интеллектуальной поддержки принятия решений. Практика сценарного моделирования показала, что в большинстве случаев количество отличающихся типов событий, получаемых в процессе моделирования спектра сценариев, не превышает двузначного числа.

Пусть каждое событие определяется функцией от ф-сценариев, заданных в целевом сценарии и автоматически идентифицированных в полученных результатах моделирования $FSc(v_i, t_n + P)$, при этом $v_i \in V^{(3n)}$. Тогда количество типов событий определяется областью значений этой функции. Иными словами, набор факторов, для которых рассчитываются ф-сценарии, образует вектор признаков множества событий [3].

В программном комплексе сценарного моделирования [4] типы событий также обозначаются натуральными числами. Таким образом, описание сценария можно представить словом в алфавите

типов событий и символа-разделителя (например, ";"), который является подмножеством множества натуральных чисел \mathbb{N}^* (без нуля¹) и символа-разделителя. Тогда можно говорить, что для оценки близости двух сценариев, исключая тип 0, который соответствует неопределенному событию, используется представление сценариев в виде слов в алфавите:

$$C^{3n} = \{ "; ", 1, 2, 3, 4, 5, \dots \} = \mathbb{N}^* \cup "; ", "$$

Приведем пример сценарного моделирования на основе модели геополитических разногласий в Арктике (рис. 3). Описание и сценарное исследование модели при различных условиях и управляющих воздействиях приведено в работе [4].

На рис. 4 представлен пример результатов сценарного моделирования, где события определяются на основе ф-сценариев восьми выбранных факторов.

На шкале состояний представлены цифровые обозначения типов событий, в данном случае от 1 до 8. В представленном примере типы событий (с учетом табл. 2) распределены по шагам моделирования так, как представлено на рис. 5. Изменение динамики хотя бы одного из ключевых факторов означает завершение текущего события и начало формирования нового. На рис. 5 представлен фрагмент пособытийного автоматически сгенерированного программно-аналитическим комплексом (ПАК) «Полос» текста сценария, где заглавными буквами обозначены факторы и их динамика, которые привели к формированию нового события, а прописными – факторы, ф-сценарии которых остались прежними (совпали с предыдущим событием).

Таким образом, для рассмотренного примера при $t = t_r = 72$

$$TEv^{(3n)}(t) = \begin{cases} 1, & \text{если } t = \overline{1, 5}, \\ 2, & \text{если } t = \overline{6, 10}, \\ 3, & \text{если } t = \overline{11, 15}, \\ 2, & \text{если } t = \overline{16, 20}, \\ 4, & \text{если } t = \overline{21, 40}, \\ 5, & \text{если } t = \overline{41, 60}, \\ 6, & \text{если } t = \overline{61, 67}, \\ 7, & \text{если } t = \overline{68, 72}. \end{cases}$$

¹ Здесь и далее используются обозначения стандартов ISO 31-11 (1992 г.), ISO 80000-2 (2009 г.), ГОСТ Р 54521-2011 (2011 г.).

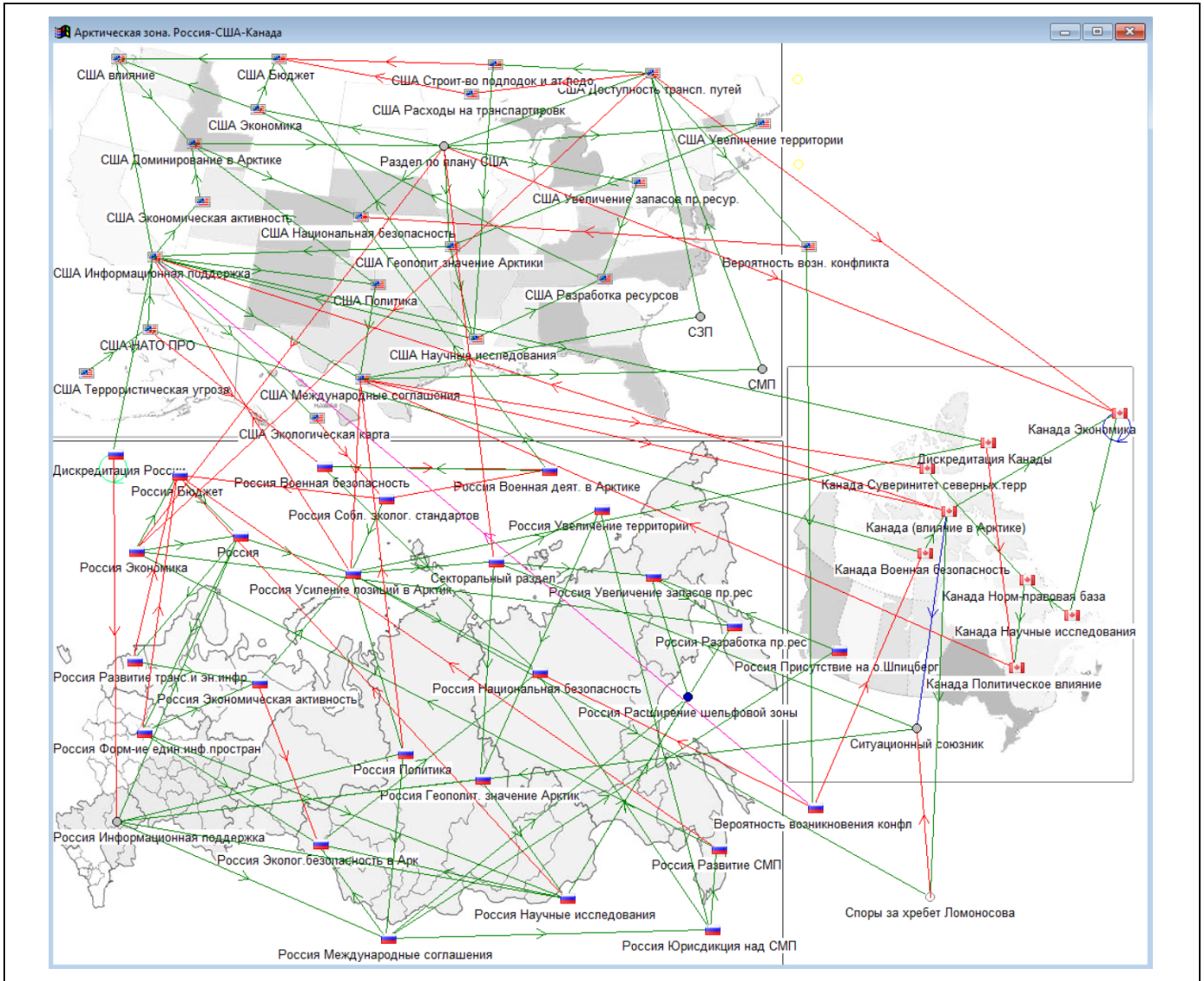


Рис. 3. Пример структуры сценарной модели

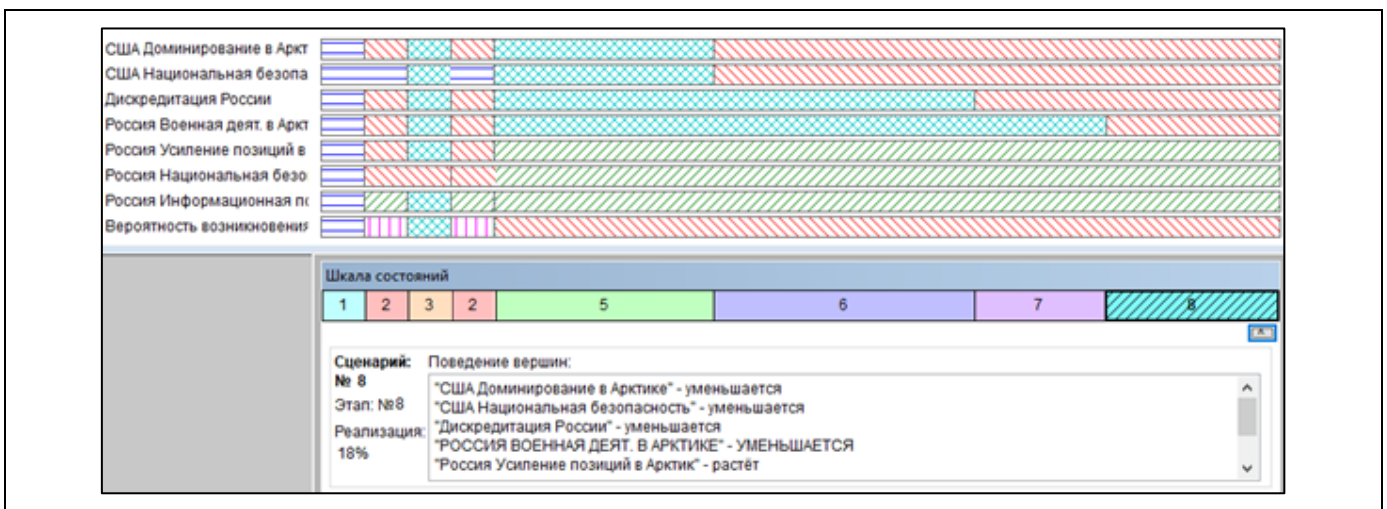


Рис. 4. Пример результатов сценарного моделирования

В качестве меры близости двух сценариев \mathfrak{R}^0 и \mathfrak{R}^j ($\mathfrak{R}^j \in \tilde{\mathfrak{R}}, j=1,2,\dots,N^{\mathfrak{R}}$) в момент времени t можно, например, использовать модификацию расстояния Хэмминга [6] $d_H(\mathfrak{R}^0, \mathfrak{R}^j)$:

$$d_H(\mathfrak{R}^0, \mathfrak{R}^j, t) = \sum_{k=t-t_r+1}^t |TEv^{(3H)0}(k) - TEv^{(3H)j}(k)|. \quad (2)$$

В настоящей работе под сравнением событий для краткости понимается сравнение событий по их типу. Также в дальнейшем будем считать, что под δ_H понимаем $\delta_H(\mathfrak{R}^0, \mathfrak{R}^j)$, не оговаривая каждый раз особо.

По сути, используется сходство двух слов (сценариев), определенных на алфавите (пространстве типов событий) $C = \{TEv^{(3H)0}(k)\} \cap \{TEv^{(3H)j}(k)\}$. Для сравнения множества сценариев с целевым алфавитом может расширяться, включая на каждом шаге объединения новые события $C = \{TEv^{(3H)0}\} \cap \{TEv^{(3H)1}\} \cap \dots \cap \{TEv^{(3H)j}\}$. Такая постановка позволяет использовать существующие алгоритмы сравнения символьных строк [7, 8].

Таким образом, на момент времени t пара $(T\mathfrak{R}(t), d_H(t))$, состоящая из множества $T\mathfrak{R}(t) \in T\mathfrak{R}^i(t)$ представленных в виде типов событий сценариев (1), и функция их попарного сравнения $d_H(\mathfrak{R}^i, \mathfrak{R}^j, t): T\mathfrak{R}(t) \times T\mathfrak{R}(t)$, отображающая декартов квадрат множества во множество вещественных чисел, называется сценарным метрическим пространством, поскольку выполняются условия (аксиомы) тождества, неотрицательности, симметричности, треугольника:

1. $d_H(\mathfrak{R}^i, \mathfrak{R}^j, t) = 0 \Leftrightarrow \mathfrak{R}^i = \mathfrak{R}^j$;
2. $d_H(\mathfrak{R}^i, \mathfrak{R}^j, t) > 0$;
3. $d_H(\mathfrak{R}^i, \mathfrak{R}^j, t) = d_H(\mathfrak{R}^i, \mathfrak{R}^m, t) + d_H(\mathfrak{R}^m, \mathfrak{R}^j, t)$.

При этом:

- $T\mathfrak{R}(t)$ является подлежащим множеством, или носителем сценарного метрического пространства;
- $d_H(t)$ – метрика, или функция расстояния;
- сценарии \mathfrak{R}^i являются точками сценарного метрического пространства.

В рассматриваемом выше примере два сценария тем более схожи, чем по меньшему количеству

событий на временной оси, ограниченной глубиной сценария, они различаются. В двух крайних случаях последовательность событий двух сценариев \mathfrak{R}^0 и \mathfrak{R}^j может или полностью совпадать, или полностью различаться. Эти соображения приводят к возможности использовать уже известные меры. Простым примером одной из таких мер является расстояние Хэмминга, для определения которого в работе используется количество различающихся событий для полученных в результате моделирования сценариев на одном и том же временном интервале. В этом случае мера сходства δ_H определяется как

$$\delta_H(\mathfrak{R}^0, \mathfrak{R}^j) = 1 - \frac{d_H(\mathfrak{R}^0, \mathfrak{R}^j, K)}{K}. \quad (3)$$

Однако если определять расстояние $d_H(\mathfrak{R}^0, \mathfrak{R}^j, k)$, как это показано в формуле (2), то разность между различными парами типов событий будет сильно отличаться: например, между ростом и падением разница будет $|1-2|=1$, а между ростом и колебаниями, ограниченными по амплитуде, $|1-4|=3$. Для оценки несовпадения сценариев \mathfrak{R}^0 и \mathfrak{R}^j целесообразно проводить анализ только случаев несовпадения типов событий. С этой целью в формуле (2) числовую операцию $|TEv^{(3H)0}(k) - TEv^{(3H)j}(k)|$ вполне естественно заменить двоичной функцией сравнения:

$$\theta(TEv^{(3H)0}(k), TEv^{(3H)j}(k)) = \begin{cases} 0, & \text{если } TEv^{(3H)0}(k) = TEv^{(3H)j}(k); \\ 1, & \text{если } TEv^{(3H)0}(k) \neq TEv^{(3H)j}(k). \end{cases} \quad (4)$$

В соотношении (4) рассматриваются крайние бинарные случаи: если события совпадают, то $\theta=0$, если различаются, то $\theta=1$, т. е. $\theta \in \{0, 1\}$. Однако на практике при оценке близости сценариев иногда бывает необходимо использовать нечеткое сходство, т. е. $\theta \in [0, 1]$, или стоимость несовпадения. Таким образом, одна пара событий может обладать большим сходством, чем другая, несмотря на то, что полное сходство с соответствующим целевым событием отсутствует. Следовательно, в общем случае целесообразно ввести матрицу стоимостей различий событий (типов событий), по главной диагонали которой стоят нули (полное сходство), а остальные элементы – стоимости различия в типах событий, которые также в общем случае зависят от шага моделирования t :



Таблица 3

Формирование промежуточных параметров, используемых в формулах оценки

Параметр	Символ в $\Theta(\mathcal{R}^0, \mathcal{R}^i)^*$	Символ в $\Theta(\mathcal{R}^0, \mathcal{R}^j)^*$	Значение
Nr_I	1	–	30
Nr_j	–	1	58
Nr_i	0	–	42
Nr_J	–	0	14
Nr_{IJ}	1	1	19
Nr_{iJ}	0	1	3
Nr_{ij}	1	0	11
Nr_{ij}	0	0	39

Таблица 4

Методы определения меры связности сценариев

Наименование меры	Соотношение	Значение
Коэффициент Джаккара (Жаккара)	$c_{ij} = \frac{Nr_{IJ}}{Nr_{IJ} + Nr_{iJ} + Nr_{ij}}$	0,2753
Коэффициент Россела	$c_{ij} = \frac{Nr_{IJ}}{K}$	0,2638
Коэффициент Тонимото – Дойла	$c_{ij} = \frac{Nr_{IJ}}{Nr_I + Nr_J - Nr_{IJ}}$	0,2753
Коэффициент Сокола – Мигнера	$c_{ij} = \frac{Nr_{IJ} + Nr_{ij}}{K}$	0,3055
Коэффициент Тонимото – Роджерса	$c_{ij} = \frac{Nr_{IJ} + Nr_{ij}}{K + Nr_{iJ} + Nr_{ij}}$	0,1803
Обобщенный составной коэффициент Кульчинского	$c_{ij} = \frac{1}{4} \left(\frac{Nr_{IJ}}{Nr_I} + \frac{Nr_{IJ}}{Nr_J} + \frac{Nr_{ij}}{Nr_i} + \frac{Nr_{ij}}{Nr_j} \right)$	0,3116
Коэффициент Дейка	$c_{ij} = \frac{2Nr_{IJ}}{2Nr_{IJ} + Nr_{iJ} + Nr_{ij}}$	0,4318
Коэффициент удельного веса совпадения	$c_{ij} = \frac{2Nr_{IJ}}{K + Nr_{IJ} + Nr_{ij}}$	0,4042
Коэффициент удельного веса несовпадения	$c_{ij} = \frac{Nr_{IJ}}{Nr_{IJ} + 2(Nr_{ij} + Nr_{iJ})}$	0,1596
Составной коэффициент Кульчинского	$c_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{Nr_{IJ}}{Nr_I} + \frac{Nr_{IJ}}{Nr_J} \right)$	0,4804
Коэффициент Отиаи	$c_{ij} = \frac{Nr_{IJ}}{\sqrt{Nr_I Nr_J}}$	0,4554
Обобщенный коэффициент Отиаи	$c_{ij} = \frac{Nr_{IJ} Nr_{ij}}{\sqrt{Nr_I Nr_J Nr_i Nr_j}}$	0,0563
Коэффициент «подтверждения»	$c_{ij} = \frac{1}{K} \left(Nr_{IJ} + \frac{Nr_{ij}}{K + 1 - Nr_{IJ}} \right)$	0,2646

Развитием предложенных методов для оценки сценариев является добавление параметра, характеризующего затраты (стоимость) $Cost(U^j)$ на осуществление управляющих воздействий, приводящие к реализации сценария \mathfrak{R}^j , которые также имеет смысл рассматривать в диапазоне от 0 до 1. В таком случае рассматривается суммарная оценка близости и затрат.

Рассмотренные процедуры могут применяться в случаях с несколькими целевыми сценариями $\mathfrak{R}^0 = \{\mathfrak{R}^{0,m}\}$, $m = 1, \dots, M$, которые, например, могут иметь разные приоритеты, или если на множестве целевых сценариев определены отношение предпочтения (например, как строгого $\mathfrak{R}^{0,1} \succ \mathfrak{R}^{0,2}$, так и слабого $\mathfrak{R}^{0,1} \succsim \mathfrak{R}^{0,2}$). В таком случае каждый полученный сценарий должен сравниваться с каждым целевым и полученные оценки близости могут нормироваться по коэффициенту приоритета или по отношению предпочтения (на практике обычно в соответствии с ординалистской теорией полезности).

В том случае, если промежуточные события не важны, то цели составляют конечные состояния (события).

Целевой сценарий также может задаваться в виде нелинейной структуры событий, образуя сценарно-технологический резерв достижения цели, если существует угроза реализации некоторых событий. Примером может служить ориентированный граф, связывающий начальные состояния моделируемой системы (h_i) с конечными (e_i) (рис. 8).

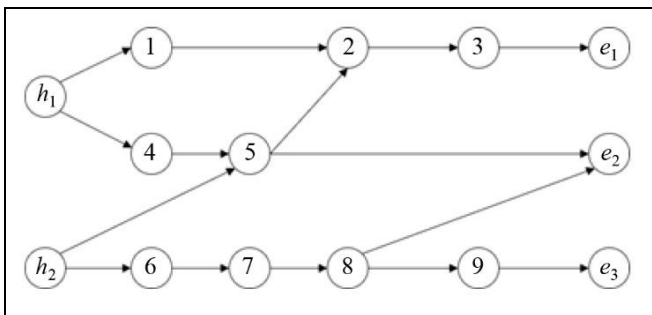


Рис. 8. Пример нелинейного целевого сценария

Возможные пути между начальными и конечными вершинами (событиями) составляют сценарии достижения целей.

В случае нелинейного целевого сценария возникает ряд задач анализа структуры, соответствующей графовой модели, например поиск критических событий, обязательных для достижения кон-

кретных или всех целей, поиск компонент сильной связности (циклы событий) и т. п. В данной работе эти задачи не рассматриваются, поскольку алгоритмы их решения уже реализованы (например, в работе [7]).

В качестве еще одного важного направления использования описанной методики оценки можно указать решение задачи обучения графовой сценарной модели, которую можно сформулировать как подстройку весов или корректировку функциональных взаимосвязей для минимизации ошибки, которая определяется как погрешность между полученными результатами моделирования и эталонным сценарием (или несколькими эталонными сценариями), например, известным из исторических наблюдений или определенным экспертным путем.

4. ОЦЕНИВАНИЕ СХОДСТВА СЦЕНАРИЕВ ПО ПАРАМЕТРАМ СОБЫТИЙ

Возможен вариант целевого сценария, когда важным является присутствие значимых для целей управления событий на отдельных этапах (временных отрезках). В этом случае целевой сценарий может быть прерывистым (или состоять из нескольких отстающих друг от друга фрагментов), т. е. на определенных временных отрезках не предъявляются требования к поведению системы. Для подобного целевого «прерывистого сценария» необходимо ввести индифферентный тип события 0, т. е. расширенный алфавит для представления сценариев в виде слов будет выглядеть так:

$$C^{\mathfrak{R}} = \{ ", " , 0, 1, 2, 3, 4, 5, \dots \} = \mathbb{N} \cup ", "$$

$$\theta(TEv^{(\text{зн})0}(k), TEv^{(\text{зн})j}(k)) = \begin{cases} 0, & \text{если } TEv^{(\text{зн})0}(k) = TEv^{(\text{зн})j}(k) \vee \\ & \vee TEv^{(\text{зн})0}(k) = 0, \\ 1, & \text{если } TEv^{(\text{зн})0}(k) \neq TEv^{(\text{зн})j}(k). \end{cases}$$

Также можно для оценки близости сценариев использовать оценки близости событий на основе расхождений ϕ -сценариев, из которых это событие формируется. Для унификации написания формул будем в дальнейшем определять ϕ -сценарии также в локальном времени (на k -м шаге моделирования) оцениваемых сценариев, т. е. для фактора v_n в сценарии \mathfrak{R}^j $FSc(v_n^j(k)) = FSc(v_n^j(t - t_r))$.

Например, если на k -м локальном шаге сценария \mathfrak{R}^j экспертно-значимым событием является



последовательность ф-сценариев значимых факторов, т. е. если

$$E^{(3H)j}(k) = \{FSc(v_n^j(k))\}, v_n^j \in V^{(3H)},$$

то

$$\begin{aligned} & \theta(TEv^{(3H)0}(k), TEv^{(3H)j}(k)) = \\ & = \frac{1}{|V^{(3H)}|} \sum_{v_n \in V^{(3H)}} \theta^{(\Phi)}(FSc(v_n^0(k)), FSc(v_n^j(k))), \end{aligned} \quad (5)$$

где

$$\begin{aligned} & \theta^{(\Phi)}(FSc(v_n^0(t_i)), FSc(v_n^j(t_i))) = \\ & = \begin{cases} 0, & \text{если } FSc(v_n^0(t_i)) = FSc(v_n^j(t_i)), \\ 1, & \text{если } FSc(v_n^0(t_i)) \neq FSc(v_n^j(t_i)). \end{cases} \end{aligned} \quad (6)$$

Или, вводя стоимость разницы между типами динамик факторов $c(d^0, d^j, t) = [0, 1]$, где d – динамика фактора ($d = 1, 2, 3, 4, 5, 6$) получим:

$$\begin{aligned} & \theta^{(\Phi)}(FSc(v_n^0(t_i)), FSc(v_n^j(t_i))) = \\ & = c_{FSc(v_n^0(t_i)), FSc(v_n^j(t_i))}(t). \end{aligned} \quad (7)$$

Таким образом, вводится матрица стоимостей различий, по главной диагонали которой стоят нули, а остальные элементы – стоимости различия в динамиках, которые также в общем случае зависят от шага моделирования t :

$$c(t) = \begin{bmatrix} 0 & c_{1,2}(t) & c_{1,3}(t) & c_{1,4}(t) & c_{1,5}(t) & c_{1,6}(t) \\ c_{2,1}(t) & 0 & c_{2,3}(t) & c_{2,4}(t) & c_{2,5}(t) & c_{2,6}(t) \\ c_{3,1}(t) & c_{3,2}(t) & 0 & c_{3,4}(t) & c_{3,5}(t) & c_{3,6}(t) \\ c_{4,1}(t) & c_{4,2}(t) & c_{4,3}(t) & 0 & c_{4,5}(t) & c_{4,6}(t) \\ c_{5,1}(t) & c_{5,2}(t) & c_{5,3}(t) & c_{5,4}(t) & 0 & c_{5,6}(t) \\ c_{6,1}(t) & c_{6,2}(t) & c_{6,3}(t) & c_{6,4}(t) & c_{6,5}(t) & 0 \end{bmatrix}.$$

Теоретически матрица стоимостей различий может быть несимметрична относительно главной диагонали, хотя тогда нарушится свойство симметричности меры сходства. Возможно, существуют случаи, когда нарушение свойства симметричности соответствует логике решения поставленной задачи управления, но в данной работе они не рассматриваются. Поэтому будем считать матрицу стоимостей симметричной, т. е. $c_{i,j}(t) = c_{j,i}(t)$.

В общем случае возможно существование матриц стоимостей различий для каждого значимого фактора $v_n \in V^{(3H)}$, т. е. $c(t, v_n)$. При этом вполне

можно допустить существование элементов на главной диагонали, значения которых отличны от нуля. Например, $c_{2,2}(t, v_3) = 1$ означает что в целевом сценарии нежелательно уменьшение фактора v_3 в момент времени t .

Также стоимости могут определяться условными выражениями. Например, если в сравниваемых сценариях один из факторов имел несовпадающие тенденции роста и уменьшения, то для другого фактора стоимость между ростом и постоянным значением равна 0,1, а иначе 0,5, т. е. повышается степень безразличия к такому несходству.

Пусть стоимость расхождения между динамиками роста и падения равна 1, а между ростом и постоянным значением равна 0,2 при $t = [10, 20]$ и т. п. То есть могут быть разные стоимости близости отличающихся динамик в определенные периоды времени сравниваемых сценариев, например

$$\begin{aligned} & (FSc(v_n^0(t_i)) = 1, FSc(v_n^j(t_i)) = 3, t) = \\ & = c_{1,3}(t) = \begin{cases} 0,2, & \text{если } t = [10, 20], \\ 0,1, & \text{если } t = [31, 45], \\ 1, & \text{иначе.} \end{cases} \end{aligned}$$

Тогда мера сходства δ_H сценариев \mathfrak{R}^0 и \mathfrak{R}^j , представляющих собой конечные последовательности событий $\mathfrak{R}^0 = \{E_1^{(3H)0}, E_2^{(3H)0}, \dots, E_K^{(3H)0}\}$ и $\mathfrak{R}^j = \{E_1^{(3H)j}, E_2^{(3H)j}, \dots, E_K^{(3H)j}\}$ или типов событий $T\mathfrak{R}^0 = \{TE_1^{(3H)0}, TE_2^{(3H)0}, \dots, TE_K^{(3H)0}\}$ и $T\mathfrak{R}^j = \{TE_1^{(3H)j}, TE_2^{(3H)j}, \dots, TE_K^{(3H)j}\}$ по Хэммингу определяется как

$$\delta_H(\mathfrak{R}^0, \mathfrak{R}^j) = 1 - \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K \theta(TEv_m^{(3H)0}, TEv_m^{(3H)j}).$$

В случае оценивания сходства по составляющим событий, например как в соотношениях (5)–(7), $TEv_m^{(3H)j}$ будет представлять собой матрицу с количеством столбцов по числу значимых для формирования событий факторов $|V^{(3H)}|$ и количеством строк, равным числу шагов моделирования K :

$$TEv^{(3H)j} = \{E^{(3H)j}(k) = \{FSc(v_n^j(k))\}, v_n^j \in V^{(3H)}\}.$$

На рис. 9 представлены результаты стохастического сценарного моделирования, которые получены путем автоматического пятикратного запуска сценарной модели, у которой в качестве веса дуги «Канада – влияние в Арктике» используется функция, один из параметров которой формируется генератором последовательности псевдослучайных чисел.

На рис. 9 представлено сравнение верхнего сценария (последовательности типов событий) с пятью сценариями, полученными в результате моделирования, и рассчитан процент совпадения.

Пример 2. Оценки близости по ф-сценариям (по детализации событий).

На рис. 10 и 11 представлены соответствующие двум сценариям \mathfrak{N}^1 и \mathfrak{N}^2 матрицы пошагового изменения ф-сценариев значимых факторов, полученных в результате моделирования (матрица на рис. 11 соответствует сценарию, представленному в текстовом пособийном виде на рис. 4).

Тогда в соответствии с формулами (3), (5)–(7) при матрице стоимостей различий со всеми элементами, равными единице ($c_{i,j}(t)=1$ при $i \neq j$), кроме элемен-

тов главной диагонали ($c_{i,i}(t)=0$), получаем $\delta_H(\mathfrak{N}^1, \mathfrak{N}^2) \approx 0,689$.

Если для оценки критически важными являются совпадения событий на нескольких последних, например, 20-ти шагах (52–71), а стоимости различий на предыдущих шагах растут линейно с шагом моделирования, т. е.

$$c_{i,j}(t) = \begin{cases} t/52, & \text{если } i \neq j, t = 1, 2, \dots, 52, \\ 1, & \text{если } i \neq j, t > 52, \\ 0, & \text{если } i = j, \end{cases}$$

то $\delta_H(\mathfrak{N}^1, \mathfrak{N}^2) \approx 0,748$. ♦

Если получен спектр (множество) полученных при различных условиях сценариев $\mathfrak{N}^j \in \mathfrak{N} = \{\mathfrak{N}^j\}, j = 1, 2, \dots, N^{\mathfrak{N}}$, и целевой сценарий \mathfrak{N}^0 , то можно построить матрицу сходства размером $[N^{\mathfrak{N}} + 1, N^{\mathfrak{N}} + 1]$ попарных мер их сходства

$$\delta_H = \begin{bmatrix} 1 & \delta_H(1,0) & \dots & \delta_H(0, N^{\mathfrak{N}} - 1) & \delta_H(0, N^{\mathfrak{N}}) \\ \delta_H(1,0) & 1 & \dots & \delta_H(1, N^{\mathfrak{N}} - 1) & \delta_H(1, N^{\mathfrak{N}}) \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \delta_H(N^{\mathfrak{N}} - 1, 0) & \delta_H(N^{\mathfrak{N}} - 1, 1) & \dots & 1 & \delta_H(N^{\mathfrak{N}} - 1, N^{\mathfrak{N}}) \\ \delta_H(N^{\mathfrak{N}}, 0) & \delta_H(N^{\mathfrak{N}}, 1) & \dots & \delta_H(N^{\mathfrak{N}}, N^{\mathfrak{N}} - 1) & 1 \end{bmatrix},$$

где $\delta_H(i, j) = \delta_H(\mathfrak{N}^i, \mathfrak{N}^j)$, $i, j = 0, 1, 2, \dots, N^{\mathfrak{N}}$, – мера сходства, или коэффициент близости сценариев \mathfrak{N}^i и \mathfrak{N}^j , которая является неотрицательной вещественной функцией, при этом

$$0 \leq \delta_H(\mathfrak{N}^i, \mathfrak{N}^j) \leq 1, \\ \delta_H(\mathfrak{N}^i, \mathfrak{N}^i) = 1.$$

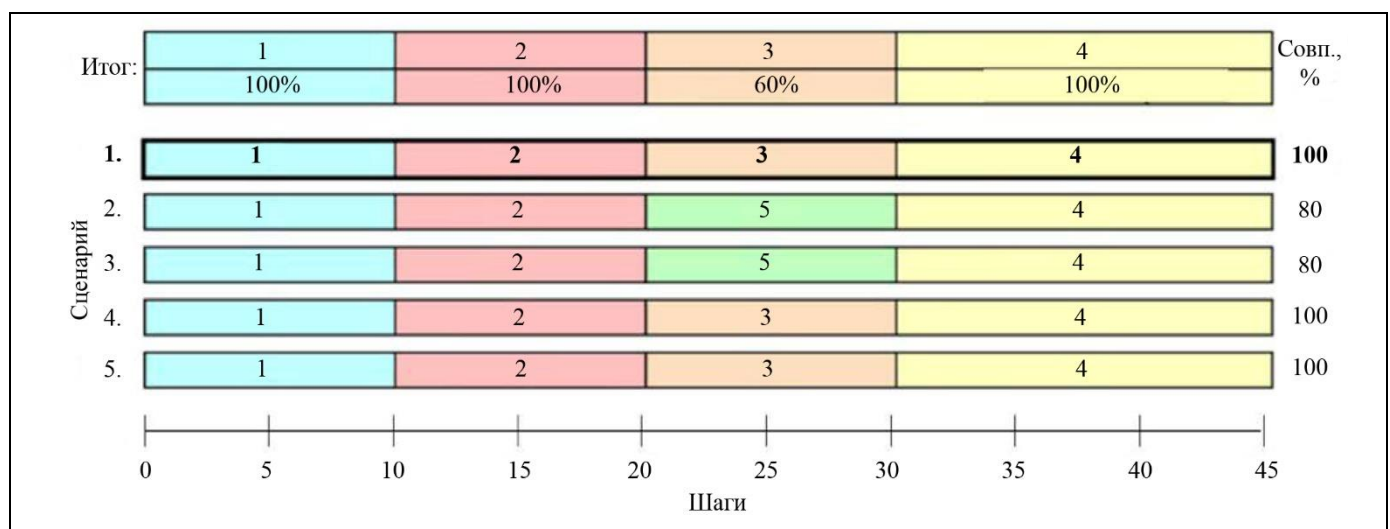


Рис. 9. Оценка полученных сценариев по степени сходства с целевым

Таблица 5

Операции над событиями сценария

Наименование операции	Обозначение операции	Количество операций	Стоимость операции
Удаление	O^{del}	N^{del}	c^{del}
Вставка	O^{ins}	N^{ins}	c^{ins}
Замена	O^{rpl}	N^{rpl}	c^{rpl}
Транспозиция (перестановка двух соседних событий)	O^{trp}	N^{trp}	c^{trp}

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Сложность решения проблем сценарного управления заключается в том, что при оценке эффективности сценариев, полученных в результате имитационного моделирования при определенных управленческих воздействиях часто приходится сталкиваться, во-первых, с трудностями выделения событий, а во-вторых, с их представлением в виде, пригодном для получения численных оценок их близости с событиями целевого сценария.

В настоящей работе определение эффективности управления при сценарном моделировании заключается в задании целевого сценария в дискретном множестве событий и выборе одного из множества альтернативных сценариев, наиболее отвечающих цели управления. Критерий оптимальности управления определяется на основе характеристик сценариев, соответствующих вариантам управления, в том числе путем выбора из множества альтернативных сценариев наиболее близкого к целевому или безопасному сценарию, т. е. решается задача максимизации меры их близости. При ресурсных ограничениях возникает необходимость использования показателей, учитывающих затраты на управление, что приводит к критерию минимакса.

Разработан алгоритм кодирования сценариев в виде последовательности уникальных типов событий, реализуемых на последовательности шагов моделирования.

Разработан метод попарной оценки одного сценария из спектра полученных с целевым сценарием по сходству событий в каждый дискретный момент времени. Представление сценариев в пространстве уникальных типов дискретных событий позволило в качестве меры близости двух сценариев как использовать модифицированные процедуры прямого сравнения символьных строк с учетом стоимости различий между типами событий, так и использовать это сравнение с учетом результатов некоторых операций (вставки, удаления,

транспозиции) над событиями сценариев с учетом стоимостей этих операций.

Развитием предложенных методов является метод определения сходства двух сценариев на основе совпадений событий, например, в смежных или разрозненных периодах времени, который использует предложенный алгоритм кодировки сценариев и известный алгоритм определения сходства текстовых строк на основе схожих сочетаний из m смежных символов – m -грамм. Это позволяет оценивать присутствие значимой целевой последовательности событий в полученном сценарии. Таким образом, сама цель может задаваться в виде фрагмента сценария, который необходимо реализовать в управлении независимо от позиции в достигнутом сценарии. При этом результаты сравнения также формируют события, которые динамически учитываются в процессе моделирования, например, как условия активности подструктур модели, индикаторы или как события, инициирующие изменение структуры объекта управления, смену субъекта управления и т. п.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Модели и методы анализа и синтеза сценариев развития социально-экономических систем: в 2-х кн.* / Под ред. В.Л. Шульца и В.В. Кульбы. – М.: Наука, 2012. Кн. 1. – 304 с., кн. 2. – 358 с. [*Models and methods for analysis and synthesis of development scenarios for socio-economic systems: in 2 books* / Edited by V.L. Shults and V.V. Kulba. – Moscow: Nauka, 2012. Book 1. – 304 p., Book 2. – 358 p. (In Russian)]
2. *Чернов И.В.* Сценарно-когнитивное моделирование сложных систем на основе событийной идентификации динамики факторов // *Проблемы управления.* – 2023. – № 3. – С. 65–76. [*Chernov, I.V.* Scenario-Cognitive Modeling of Complex Systems Based on Event-Driven Identification of Factor Dynamics // *Control Sciences.* – 2023. – No. 3. – P. 55–64.]
3. *Ваховов А. А., Кадыров А. Л.* Определение меры близости задач управления // *Вестник ТГУПБП.* – 2009. – №4(40). – С. 38–46. [*Vakhobov, A.A., Kadyrov, A.L.* Determination of the Measure of Closeness of Control Problems // *Bulletin of TSULBP.* – 2009. – No. 4(40). – P. 38–46. (In Russian)]



4. Шульц В.Л., Кульба В.В., Шелков А.Б., Чернов И.В. Сценарный анализ в управлении геополитическим информационным противоборством. – М.: Наука, 2015. – 542 с. [Shultz, V.L., Kulba, V.V., Shelkov, A.B., Chernov, I.V. Scenario Analysis in Managing Geopolitical Information Confrontation. – Moscow: Nauka, 2015. – 542 p. (In Russian)]
5. Deza, M., Deza, E. Encyclopedia of Distances. Berlin-Heidelberg: Springer, 2013. – 650 p. – URL: <https://bayanbox.ir/view/6703722356777834611/Encyclopedia-of-Distances-2013-Michel-Marie-Deza-Elena-Deza-auth..pdf> (дата обращения: 28.09.2024). [Accessed September 28, 2024.]
6. Блейхут Р. Теория и практика кодов, контролирующих ошибки. – М.: Мир, 1986. – 576 с. [Blahut, R.E. Theory and Practice of Error Control Codes. – Boston: Addison-Wesley Publishing Company, 1983. – 500 p.]
7. Кормен Т.Х., Лейзерсон Ч.И., Ривест Р.Л., Штайн К. Алгоритмы: построение и анализ. – М.: «Вильямс», 2019. – 1328 с. [Cormen, T.H., Leiserson, C.I., Rivest, R.L., Stein, C. Introduction to Algorithms. – Cambridge: MIT Press, 2009. – 1313 p.]
8. Richard, W. Hamming Error-Detecting and Error-Correcting Codes // Bell System Technical Journal. – 1950. – Vol. 29, no. 2. – P. 147–160.
9. Левенштейн В.И. Двоичные коды с исправлением выпадений, вставок и замещений символов // Доклады Академии наук СССР. – 1965. – Т. 163, № 4. – С. 845–848. [Levenshtein, V.I. Binary Codes Capable of Correcting Deletions, Insertions, and Reversals // Soviet Physics Dokl. – 1965. – Vol. 10. – P. 707–710.]
10. Wagner, R.A., Fischer, M.J. The String-to-String Correction Problem // Journal of the ACM. – 1974. – Vol. 21, no 1. – P. 168–173.
11. Winkler, W.E. String Comparator Metrics and Enhanced Decision Rules in the Fellegi-Sunter Model of Record Linkage / In: Proceedings of the Survey Research Methods Sections. – Alexandria: American Statistical Association, 1990. – P. 354–359.
12. Aggarwal, C.C. Machine Learning for Text. – Cham: Springer International Publishing, 2022. – 924 p.

Статья представлена к публикации членом редколлегии
А. О. Калашиниковым.

Поступила в редакцию 29.10.2025,
после доработки 14.01.2026.
Принята к публикации 28.01.2026.

Чернов Игорь Викторович – канд. техн. наук,
Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН,
г. Москва
✉ chernov@ipu.ru,
ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-8776-3064>

© 2026 г. Чернов И. В.



Эта статья доступна по лицензии Creative Commons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная.

ASSESSING THE EFFECTIVENESS OF SCENARIOS OBTAINED BY SIMULATION MODELING

I. V. Chernov

Trapeznikov Institute of Control Sciences, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

✉ chernov@ipu.ru

Abstract. This paper considers the challenges of increasing the effectiveness of a scenario approach to planning and management processes in the development of socio-economic systems under uncertainty. Methods are proposed to assess the effectiveness of scenario management based on encoding and comparing scenarios with a target scenario. For comparison, scenarios are formally represented, using a special algorithm, as a sequence of unique event identifiers. The assessment methods involve the event similarity of scenarios, the similarity of scenarios considering operations over a sequence of events, and the similarity of events based on the qualitative behavior parameters of significant factors. An important feature of scenario management is that the goal is formulated as the final state of the system and, moreover, as a sequence of events constituting the target scenario. The effectiveness of management options and the related scenarios is assessed using a target scenario (benchmark): the results of scenario modeling and the corresponding management options are compared with the benchmark. Scenario analysis is intended to support the management process of an event leading to the goal; therefore, it is reasonable to use as a benchmark the most rational scenario in terms of several characteristics with target values for the event being conducted. Scenario events are encoded using the scenario-event approach developed previously. This approach makes the transition from a real vector space (reflecting changes in the factor values of a scenario simulation model) to an event space. Practical examples are provided: the novel approaches to assessing the effectiveness of scenarios are used in several applied problems of ensuring the sustainable and safe development of complex socioeconomic systems.

Keywords: scenario model, scenario, management, effectiveness, factor, event, simulation modeling, assessment, measure of similarity, measure of connectivity.