

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ГЛОБАЛЬНЫХ УГРОЗ НА УСТОЙЧИВОЕ РАЗВИТИЕ СТРАН И РЕГИОНОВ МИРА С ПОМОЩЬЮ БАЙЕСОВСКИХ СЕТЕЙ ДОВЕРИЯ

Ключевые слова: глобальные угрозы, устойчивое развитие, энтропия, информация, байесовские сети доверия, булевы функции.

ВВЕДЕНИЕ

Настоящая статья является развитием исследований, представленных в работах [1, 2], в которых выполнено теоретическое обоснование и компьютерное моделирование влияния системных мировых конфликтов на устойчивое развитие стран и регионов мира в глобальном контексте.

В [1] представлена математическая модель процессов устойчивого развития стран и регионов мира в форме кватерниона $\{Q\} = \vec{I}_{ql} + jI_{sec}$, в котором скалярная величина I_{sec} , умноженная на мнимую единицу j , определяет безопасность жизни людей, а его действительная часть в виде радиуса вектора \vec{I}_{ql} — качество жизни людей в пространстве трех измерений: экономического (I_{ec}), экологического (I_e) и социально-институционального (I_s).

В [2] приведены количественные оценки совокупности основных глобальных угроз, которые влияют на составляющую безопасности жизни людей I_{sec} , и выполнено моделирование уязвимости стран и регионов мира к воздействию этих угроз с использованием методов многомерного статистического анализа. Особенность приведенных в этих работах исследований состоит в анализе линейных зависимостей между значениями уровня отдельных угроз и интегральными показателями качества и безопасности жизни людей.

В настоящей статье анализируется влияние глобальных угроз на устойчивое развитие на качественном уровне с использованием байесовских сетей доверия (БСД), основанных на теории причинности (causality) [3], с учетом как линейных, так и нелинейных зависимостей.

Использование в таких задачах БСД, представляющих собой графическую модель вероятностных взаимоотношений на множестве переменных, совместно с аппаратом математической статистики дает ряд преимуществ — позволяет выявить причинно-следственные зависимости между различными переменными и, следовательно, облегчить понимание таких сложных явлений и процессов, как устойчивое развитие. Кроме того, БСД, имея как причинно-следственную, так и вероятностную семантику, являются удобным средством для совместного представления экспертных знаний, определяющих причинно-следственные зависимости, и статистических данных, полученных инструментальным путем (измерения, наблюдения, вычисления).

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Рассмотрим следующую совокупность глобальных угроз, влияющих на устойчивое развитие стран и регионов мира [2]: ES — энергетическая безопасность; VB — баланс между биологической продуктивностью Земли и совокупным потреблением; $GINI$ — неравенство доходов населения различных стран; GD — уязвимость к глобальным болезням; CM — детская смертность; CP — чувстви-

© М.З. Згуровский, А.А. Болдак, Т.Н. Померанцева, 2010

тельность к коррупции; WA — доступ к питьевой воде; GW — влияние на процесс глобального потепления в смысле выбросов CO_2 ; SF — степень несостоятельности государства; ND — уязвимость к природным катастрофам.

Исходные количественные данные по индексам устойчивого развития, по каждой из этих угроз, а также по значению внутреннего валового продукта страны (GDP) на 2009 год, которые будут использоваться для построения БСД, представлены в [2]. Поскольку эти данные изменяются в разных диапазонах и имеют разные физические размерности, будем использовать их нормированные значения [4]:

$$z_{i,j} = \frac{x_{i,j} - \overline{X_j}}{\sigma(X_j)}, \quad (1)$$

где $\overline{X_j} = \frac{\sum_{i=1}^n x_{i,j}}{n}$ — среднее значение индекса устойчивого развития, угрозы и GDP; n — число анализируемых строк; $\sigma(X_j) = \sqrt{\sum_{i=1}^n (x_{i,j} - \overline{X_j})^2}$ — стандартное отклонение переменной X_j .

Нормированные таким образом данные имеют нулевое среднее и единичную дисперсию. Данные для индексов устойчивого развития, глобальных угроз, а также GDP стран мира в 2009 г. представлены в табл. 1.

Таблица 1

Страна	GDP	Данные для индексов устойчивого развития						Данные для показателей глобальных угроз									
		Q	I_{ql}	I_{ec}	I_e	I_s	I_{sec}	ES	BB	$GINI$	GD	CM	CP	WA	GW	SF	ND
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Албания	-0.65	0.20	0.20	-0.35	0.71	0.08	0.17	-0.24	-0.35	0.80	-0.67	0.41	-0.53	0.46	0.72	-0.25	0.21
Армения	-1.01	-0.57	-0.03	0.08	0.08	-0.18	-1.29	-0.76	-0.23	0.53	-0.61	0.19	-0.75	0.21	0.30	0.57	-6.78
Аргентина	-0.02	0.17	0.20	-1.02	0.49	0.68	0.12	-0.68	1.70	-1.21	0.75	0.45	-0.75	0.46	0.80	-1.39	0.21
Австрия	1.55	1.23	1.28	1.16	1.26	1.12	1.05	-0.41	-0.69	0.99	1.11	0.82	1.60	0.72	-0.78	0.15	0.21
Австралия	1.41	1.55	1.28	1.98	0.28	1.45	1.80	3.47	2.29	0.39	1.36	0.78	1.87	0.72	-2.39	0.49	0.18
Азербайджан	-0.66	-0.74	-0.47	-0.34	-0.49	-0.45	-1.05	-0.75	-0.38	0.26	-0.88	-1.73	-1.21	-0.76	0.32	0.71	0.21
Босния и Герцеговина	-0.52	-0.30	-0.25	-1.23	0.27	-0.03	-0.37	-0.61	-0.32	1.28	-0.19	0.49	-0.62	0.53	0.26	-3.54	0.21
Бангладеш	-0.86	-1.59	-1.88	-1.61	-1.93	-1.64	-1.05	-0.14	-0.13	0.57	-0.42	-0.95	-1.12	-0.95	1.00	-0.47	0.15
Бельгия	1.48	0.79	0.96	1.20	0.14	1.33	0.48	-0.82	-1.26	0.61	1.09	0.82	1.24	0.72	-1.22	-0.49	0.21
Болгария	-0.34	0.21	0.21	-0.08	0.15	0.39	0.20	-0.44	-0.01	0.98	-0.46	0.60	-0.44	0.66	-0.15	0.01	0.21
Бенин	-0.93	-1.41	-1.84	-1.04	-2.12	-1.74	-0.67	0.48	0.11	0.26	-0.92	-2.28	-0.66	-1.40	0.99	0.94	0.20
Боливия	-0.79	-0.84	-0.95	-1.27	-1.25	-0.31	-0.60	0.14	4.12	-2.08	-0.42	-0.88	-0.71	-0.24	0.78	-1.55	0.17
Бразилия	-0.37	0.30	0.20	-0.48	0.58	0.28	0.42	0.04	1.46	-1.77	-0.04	0.27	-0.48	0.08	0.68	0.91	0.20
Ботсвана	-0.23	-0.39	-0.41	0.32	-0.84	-0.42	-0.33	-0.38	1.42	-2.12	-2.30	-2.35	0.56	0.40	0.57	0.77	0.15
Канада	1.42	1.79	1.41	1.96	0.98	1.17	2.19	3.52	3.94	0.65	1.27	0.78	1.87	0.72	-2.33	0.54	0.21
Швейцария	1.64	1.80	1.94	2.07	1.88	1.53	1.45	-0.51	-1.17	0.54	1.39	0.82	2.01	0.72	-0.14	0.19	0.21
Чили	-0.09	1.00	0.85	1.36	0.65	0.52	1.14	-0.37	0.29	-1.56	1.04	0.67	1.06	0.40	0.27	1.07	0.20
Камерун	-0.84	-1.36	-1.68	-1.25	-1.34	-1.91	-0.79	0.91	0.51	-0.54	-1.31	-2.24	-1.03	-1.47	0.97	0.97	0.20
Китай	-0.57	-0.73	-0.64	-0.05	-1.21	-0.38	-0.79	-0.53	-0.41	-0.77	0.17	0.23	-0.44	-0.76	0.22	-0.11	0.17
Колумбия	-0.41	0.35	0.37	-0.22	1.15	-0.01	0.29	-0.28	0.60	-1.93	0.54	0.34	-0.35	0.27	0.78	0.34	0.17
Коста-Рика	-0.21	0.92	0.77	0.21	1.37	0.46	1.05	0.13	-0.17	-1.06	1.00	0.56	0.24	0.53	0.76	0.92	0.21
Чехия	0.53	0.42	0.58	0.72	-0.02	0.89	0.15	-0.71	-0.84	1.36	0.35	0.86	0.29	0.72	-1.36	-0.47	0.19
Германия	1.25	1.17	1.24	1.28	0.95	1.22	0.99	-0.73	-0.75	1.07	0.99	0.82	1.51	0.72	-0.99	0.27	0.21
Дания	1.54	1.53	1.32	1.98	0.71	1.17	1.70	-0.30	-0.75	1.43	0.84	0.86	2.14	0.72	-0.87	0.92	0.21
Доминиканская республика	-0.43	0.06	-0.03	-0.64	0.61	-0.18	0.17	-0.45	-0.26	-1.24	-0.16	0.05	-0.71	0.40	0.63	0.78	0.20
Алжир	-0.49	-0.44	-0.50	-0.69	0.00	-0.73	-0.33	0.43	-0.26	0.38	0.37	-0.25	-0.62	-0.24	0.49	0.34	0.09
Эквадор	-0.70	-0.24	0.03	-1.25	0.75	0.20	-0.61	-0.42	-0.08	-1.44	0.45	0.19	-1.16	0.33	0.62	-1.74	0.19
Эстония	0.11	0.72	0.87	1.13	0.83	0.59	0.44	-0.63	0.79	0.33	-0.30	0.78	0.92	0.72	-1.57	0.44	0.21
Египет	-0.72	-0.21	-0.54	-0.53	-0.07	-0.86	0.31	-0.66	-0.43	0.47	-0.85	-0.10	-0.80	0.59	0.63	0.88	0.12
Испания	1.07	1.02	0.88	0.71	0.62	1.03	1.14	-0.72	-1.39	0.44	1.30	0.82	0.87	0.72	-0.59	0.92	0.20
Эфиопия	-0.95	-2.34	-2.06	-1.30	-1.85	-2.30	-2.57	1.06	-0.13	0.91	-0.77	-1.87	-0.89	-4.29	1.03	0.61	-4.54
Финляндия	1.38	1.61	1.47	1.61	1.46	1.10	1.68	-0.39	1.95	1.21	1.05	0.86	2.01	0.72	-1.66	0.86	0.21

Задача настоящего исследования состоит в установлении на качественном уровне причинно-следственных зависимостей между представленными угрозами и индексами устойчивого развития. На этой основе вырабатывается целостная интерпретация процессов устойчивого развития стран и регионов мира, а также оценивается уязвимость этого развития к воздействию совокупности указанных угроз.

НЕКОТОРЫЕ БАЗОВЫЕ ОПРЕДЕЛЕНИЯ И ПОНЯТИЯ

1. БСД представляет собой направленный ациклический граф, каждая вершина которого ассоциируется с дискретной случайной величиной $X_i, i = \overline{1, n}$, принимающей значения $x_i^j, j = \overline{1, m_i}$, а дуги определяют причинно-следственные связи между случайными величинами. С вершинами этого графа связаны таблицы условных вероятностей, рассчитанных по формуле Байеса

$$P(b|a) = \frac{P(a|b)P(b)}{P(a)}, \quad (2)$$

где a, b — случайные события; $P(a), P(b)$ — вероятности наступления событий a и b ; $P(b|a), P(a|b)$ — вероятности наступления события b при условии, что событие a произошло, и наоборот — наступления a при условии, что событие b произошло.

2. Воспользовавшись терминологией гипотез и свидетельств, обозначим H как событие, когда данная гипотеза верна, а E — как событие, когда наступило определенное доказательство (свидетельство), которое может подтвердить правильность указанной гипотезы. Тогда (2) можно переписать в виде

$$P(H|E) = \frac{P(E|H)P(H)}{P(E|H)P(H) + P(E|\bar{H})P(\bar{H})}. \quad (3)$$

Соотношение (3) устанавливает связь гипотезы со свидетельством, а также устанавливает связь наблюдаемого свидетельства с пока еще не подтвержденной гипотезой. Эта интерпретация предполагает также определение априорной вероятности гипотезы $P(H)$, назначаемой до наблюдения или проявления некоторого факта.

Определение в БСД новых свидетельств вида $E_i^j : X_i = x_i^j, i = \overline{1, n}, j = \overline{1, m_i}$, приводит к приписыванию каждой гипотезе вида $H_i^j : X_i = x_i^j, i = \overline{1, n}, j = \overline{1, m_i}$, апостериорной вероятности (3), которая определяет степень доверия к этой гипотезе.

3. Для синтеза БСД на основе данных о представленных выше угрозах необходимо решить две задачи. Первая из них связана с выделением значимых переменных и определением причинно-следственных отношений на их множестве и, как правило, решается с привлечением экспертов в области анализа угроз. Вторая задача состоит в формировании таблиц условных вероятностей, которые ассоциируются с вершинами графа БСД. Эта задача может решаться на основе вычисления условных вероятностей по имеющимся экспериментальным данным об угрозах. Следует заметить, что если экспериментальные данные об угрозах представлены в интервальных шкалах [5], то необходимо провести их дискретизацию, например с использованием кластеризации методом k -средних (k -means) [6]. На этом этапе, по существу, и происходит переход от количественных оценок к качественным.

4. Если БСД построена, то, задав пороговое значение доверия, можно определить множество подтвержденных гипотез для различных наборов свидетельств. Обобщив эти данные, получим качественную характеристику зависимостей между угрозами $X_i, i = \overline{1, n}$.

Особенность рассматриваемой модели состоит в том, что включение в нее существенных угроз и причинно-следственных связей между ними приводит к значительному росту размерности самой модели. Например, для задания таблиц условных вероятностей в модели, в которой для каждого индекса устойчивого раз-

вития определены зависимости от всех 10 глобальных угроз при условии, что $m_i = 3, i = \overline{1, n}$, понадобится использовать $7 \cdot 3^{10} = 413343$ вещественных числа. Следовательно, необходимо сократить число вершин и дуг БСД, оставив только существенные переменные и связи между ними. Одним из возможных способов преодоления указанной проблемы «размерности» является применение статистического анализа зависимостей с использованием методов оценки корреляций [7] или расчета энтропии [8]. В частности, корреляционный анализ позволяет получить оценку линейной зависимости между переменными и определить параметры линейной модели. Расчет условной энтропии может использоваться также и для индикации нелинейных зависимостей, но при этом он не дает никакой информации о виде такой зависимости.

СИНТЕЗ ТОПОЛОГИИ БСД

Пусть информационная энтропия дискретной случайной величины $X_i, i = \overline{1, n}$ (угрозы, индекс устойчивого развития, GDP), которая может принимать значения $x_i^j, j = \overline{1, m_i}$, рассчитывается по формуле

$$H(X_i) = \sum_{j=1}^{m_i} P(X_i = x_i^j) \log_2 P(X_i = x_i^j) \quad (4)$$

и является усредненной количественной оценкой степени неопределенности (неожиданности) наступления событий, связанных с тем, что переменная X_i принимает значения x_i^j . Снятие этой неопределенности приводит к получению информации, т.е. собственная информация о переменной X_i [9] определяется как

$$I(X_i) = H(X_i). \quad (5)$$

Пусть также известна верхняя оценка собственной информации [10] $I(X_i) \leq I_{\max} = \log_2 m_i, i = \overline{1, n}$ (равенство достигается при условии $P(X_i = x_i^j) = \frac{1}{m_i}, i = \overline{1, n}, j = \overline{1, m_i}$). Тогда, используя соотношения (4) и (5), можно определить меру удельной информативности переменной

$$I_s(X_i) = \frac{I(X_i)}{\log_2 m_i}. \quad (6)$$

Представим результаты вычислений значения I_s по формуле (6) для набора переменных из табл. 1. Так, удельная информативность переменной GDP равна 0,57. Соответственно $Q = 0,94, I_{ql} = 0,96, I_{ec} = 0,87, I_e = 0,90, I_s = 0,95, I_{sec} = 0,88, ES = 0,54, BB = 0,69, GINI = 0,80, GD = 0,96, CM = 0,73, CP = 0,93, WA = 0,52, GW = 0,67, SF = 0,73, ND = 0,10$. Здесь переменная ND (уязвимость к природным катастрофам) может быть исключена из рассмотрения, поскольку является малоинформативной.

Для количественной характеристики взаимного влияния переменных $X_i, X_k, i = \overline{1, n}, k = \overline{1, n}$, воспользуемся понятием взаимной информации [9]

$$I(X_i; X_k) = H(X_i) - H(X_i | X_k), \quad (7)$$

где $H(X_i | X_k) = H(X_i X_k) - H(X_k)$ — условная энтропия, вычисляемая на основе формул условных вероятностей и соотношения (4).

Согласно [9] взаимной информацией является статистическая функция двух случайных величин, определяющая количество информации, содержащейся в одной случайной величине X_i относительно другой X_k . Для взаимной информации выполняется свойство симметричности: $I(X_i; X_k) = I(X_k; X_i)$; взаимная информация независимых переменных равна нулю: $I(X_i; X_k) = H(X_i) - H(X_i | X_k) =$

$= H(X_i) - H(X_i) = 0$; взаимная информация $I(X_i; X_i)$ равна собственной информации переменной: $I(X_i; X_i) = H(X_i) - H(X_i|X_i) = H(X_i) - 0 = H(X_i) = I(X_i)$. Также известен верхний предел взаимной информации

$$I(X_i; X_j) \leq \min(H(X_i), H(X_j)). \quad (8)$$

Используя формулу взаимной информации (7) и ее верхний предел (8), можно определить удельную взаимную информативность для переменных $X_i, X_k, i = 1, n, k = 1, n$,

$$I_s(X_i; X_k) = \frac{H(X_i) - H(X_i|X_k)}{\min(H(X_i), H(X_k))}. \quad (9)$$

Очевидно, что $I_s(X_i; X_i) = 1$. Если переменные независимы, то $I_s(X_i; X_k) = 0$.

На основе данных табл. 1 с использованием (9) были рассчитаны значения удельной взаимной информативности $I_s(X_i; X_k)$ для показателя GDP, индексов устойчивого развития и угроз (табл. 2).

Таблица 2

Глобальные угрозы	Значения удельной взаимной информативности						
	GDP	Q	I_{ql}	I_{ec}	I_e	I_s	I_{sec}
<i>ES</i>	0.15	0.33	0.28	0.21	0.18	0.24	0.25
<i>BB</i>	0.23	0.26	0.25	0.21	0.17	0.30	0.25
<i>GINI</i>	0.17	0.06	0.10	0.08	0.04	0.15	0.08
<i>GD</i>	0.27	0.30	0.28	0.21	0.24	0.28	0.26
<i>CM</i>	0.18	0.47	0.42	0.24	0.38	0.42	0.30
<i>CP</i>	0.54	0.47	0.46	0.51	0.19	0.35	0.36
<i>WA</i>	0.14	0.46	0.39	0.22	0.32	0.36	0.40
<i>GW</i>	0.54	0.26	0.35	0.33	0.17	0.38	0.16
<i>SF</i>	0.08	0.13	0.09	0.09	0.07	0.07	0.13

Если задать пороговое значение $I_{st}(X_i; X_k)$ (в данном случае $I_{st}(X_i; X_k) \geq 0.33$), то можно выделить существенные зависимости между глобальными угрозами и показателями устойчивого развития (в табл. 2 соответствующие ячейки выделены жирным шрифтом.) Как видно из таблицы, такие глобальные угрозы, как *BB*, *GINI*, *SF* в меньшей степени влияют на индексы устойчивого развития по сравнению с другими угрозами, поэтому могут быть исключены из модели, что согласуется с результатами работы [2]. Следует заметить, что включение в модель причинно-следственной связи $ES \rightarrow Q$ дополняет результаты работы [2].



Šuni. 1. ĮNÄ, Įšääąęęą+ąąąą' äè' aąęęęą äèç'ķç' čėįąėüķüö ócsīē ąą óñņē+čāīā šąęāčņčā ņņšąą č šáčćķīā ġčšą

Синтезированная таким образом топология БСД, предназначенная для концептуального анализа и моделирования влияния глобальных угроз на устойчивое развитие стран и регионов мира, может быть представлена структурной схемой (рис. 1).

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ГЛОБАЛЬНЫХ УГРОЗ НА УСТОЙЧИВОЕ РАЗВИТИЕ СТРАН И РЕГИОНОВ МИРА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ БСД

Компьютерное моделирование влияния глобальных угроз проведем в несколько этапов.

1. Дискретизация исходных данных. Данные табл. 1 приведем к трем уровням дискретизации: высокому (High), среднему (Medium), низкому (Low), поскольку в рамках модели БСД могут использоваться только дискретные переменные. Также определим неизвестное значение переменных (Undefined.)

2. Построение байесовской сети доверия. Для построения и параметрической настройки модели воспользуемся системой GeNIe 2.0 [11], предназначенной для построения и моделирования байесовских сетей. На рис. 2 представлен внешний вид байесовской сети доверия, построенной в системе GeNIe 2.0. Полученная БСД позволяет оценить степень доверия к гипотезам относительно влияния различных угроз на индексы устойчивого развития стран и регионов мира и причинно-следственных зависимостей между этими переменными. Так, например, установлены свидетельства $P(E_1: I_{ql} = High) = 1$ и $P(E_2: I_{sec} = High) = 1$. Это приводит к тому, что степень доверия к гипотезам $H_1: (CM = High)$ и $H_2: (WA = High)$ очень высокая и составляет 0.99, а, например, для гипотезы $H_3: (I_{ec} = Low)$ степень доверия равна нулю. Таким образом, страны, имеющие высокие значения индексов качества и безопасности жизни, в основном характеризуются низким уровнем уязвимости к таким угрозам, как детская смертность (CM) и ограниченность доступа к питьевой воде (WA).

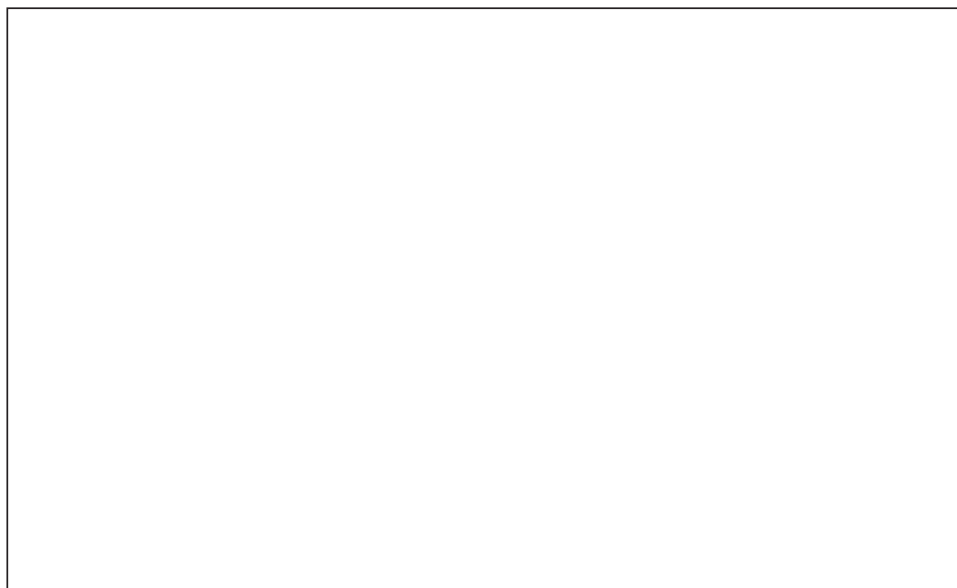


Рис. 2. Байесовская сеть доверия, построенная в системе GeNIe 2.0

3. Моделирование БСД. При выполнении моделирования БСД поставим задачу проверки двух гипотез.

Гипотеза 1. Если для рассматриваемых стран известны значения индексов устойчивого развития, то каких значений уязвимости этих стран к воздействию глобальных угроз следует ожидать?

Гипотеза 2. Если для рассматриваемых стран известны уровни уязвимости к воздействию глобальных угроз, то какие показатели устойчивого развития наиболее вероятны?

Для проверки сформулированных гипотез использовалась библиотека SMILE [11]. При этом моделирование БСД выполнялось на полных переборах свидетельств.

Для гипотезы 1 имеем

$$\{\langle E_{GDP}^i : (I_{GDP} = x_i), E_q^j : (I_q = x_j), E_{sec}^k : (I_{sec} = x_k), E_{ql}^l : (I_{ql} = x_l) \rangle\}$$

$$\forall i, j, k, l = \overline{0, 3}, x_i, x_j, x_k, x_l \in (Und., Low, Medium, High),$$

а для гипотезы 2 имеем

$$\{\langle E_{CM}^i : (CM = x_i), E_{CP}^j : (CP = x_j), E_{WA}^k : (WA = x_k), H_{GW}^l : (GW = x_l) \rangle\}$$

$$\forall i, j, k, l = \overline{0, 3}, x_i, x_j, x_k, x_l \in (Und., Low, Medium, High).$$

Таким образом, были получены два набора результатов общей длиной 512 строк. Очевидно, что их семантическая интерпретация при таком объеме является практически невыполнимой задачей. В связи с этим необходимо провести их формальное обобщение.

4. Формальное обобщение результатов моделирования. Для обобщения полученных результатов воспользуемся теоретико-множественным подходом [12], в соответствии с которым обобщение фактов, заданных своими спецификациями, может быть получено в результате теоретико-множественных операций на этих спецификациях.

Поставим в соответствие свидетельству $E_i^j : X_i = x_i^j$ булеву функцию

$$f(E_i^j : X_i = x_i^j) = \begin{cases} 1, & \text{если } P(E_i^j : X_i = x_i^j) \geq P_i; \\ 0 & \text{в противном случае,} \end{cases}$$

где P_i — заданный порог доверия.

Также определим $f(E_i^{Und} : X_i = Und)$ как функцию

$$f(E_i^{Und} : X_i = Und) = \bigcup_{\forall x_i^j \in \{Low, Medium, High\}} f_i^j(E_i^j : X_i = x_i^j).$$

Тогда набору свидетельств $e = \langle E_1, E_2, \dots, E_n \rangle$ будет соответствовать конъюнкция вида

$$f(e) = \bigcup_{i=1}^n f(E_i).$$

Для гипотезы H , подтвержденной на множестве наборов свидетельств $\{e_j\}$, $j = \overline{1, m}$, имеем

$$f(H) = \bigcup_{j=1}^m f(e_j).$$

Применяя к $f(H)$ правило импликации и метод покрытия Куайна–Мак-Класки [13], можно получить минимальное множество, покрывающее все наборы свидетельств, на которых гипотеза H подтверждена.

В табл. 3 и 4 обобщены результаты моделирования, представляющие собой минимальные множества наборов свидетельств, которые подтверждены соответственно первой и второй гипотезами.

Таблица 3

Номер строки	Набор свидетельств				Подтвержденные гипотезы типа 1								
	GDP	Q	I _{ql}	I _{sec}	I _e	I _s	ES	CM	CP	WA	GW		
1	High			High	High								
2	High		High										
3	High	High											
4			High	High	High								
5		High	High										
6		High		High									
7	High		High										
8	High	High											
9	Medium		High										
10	Medium	High											
11		High					Low						
12			High					High					
13		High											
14				High									
15		Medium	Medium										
16	Low		Medium	Medium									
17		Medium	Medium	Medium						Low			
18	Low	Medium	Medium										
19			Medium	High						Medium			
20	Low		High	Medium									
21	Medium		Medium	Medium									
22	Medium	High	Medium							High			
23	Medium			High									
24	High			High									
25	High		High										
26	Medium		Low	Low									
27	Medium		High	Low									
28	High	High											
29			High							High			
30			Medium										
31		High											
32				Medium									
33		Medium											
34	Medium			High									
35	High			High									
36	High											Low	
37	Low		High	High								High	

Таблица 4

Номер строки	Набор свидетельств				Подтвержденные гипотезы типа 2								
	CM	CP	WA	GW	GDP	Q	I _{ql}	I _e	I _{ec}	I _s	I _{sec}		
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12		
1		Low			Low								
2		Medium		Low									
3		High		Medium	Medium								
4	High	Low	High			Medium							
5	Medium	Low					Low						
6	Low		Low										
7	Low		Medium										
8	Medium		Low										
9	Medium		Medium										
10		Low	Low	High									
11	High	Low	High				Medium						
12	Medium	Medium	High										
13	High	Low		High									
14	Low	Medium	High	High									

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
15	High	High	High				High				
16		Medium		High				Medium			
17		High		Medium							
18		High		Low				High			
19	Low		Low	Medium					Low		
20	Medium		Low	Low							
21	Medium		Low	Medium							
22	Low		Low	Low							
23	Low	High	Low								
24	Medium	High	Low								
25	Low	Medium	Low								
26	Medium	Medium	Low								
27			Medium						Medium		
28	Low	Low	Low								
29	Medium	Low	Low								
30	Medium	Low	Medium								
31	Low	Low	Medium								
32	Low		Low	High							
33	Medium		Low	High							
34	Medium		Medium	High							
35	Low		Medium	High							
36	Medium	Medium	High								
37	Low	Medium	High	High						Medium	
38	High	Low	High	Medium							
39	High	High	High								
40	High	Low	Medium	High						High	
41	High	Medium	High	Medium							
42	Low	Low	Low								
43	Medium	Low	Low								Low
44	Medium	Low	Medium								
45	Low	Medium									
46	High	Low	Medium								Medium
47	High	Low	High								
48	High	High	High								High

ИНТЕРПРЕТАЦИЯ ОБОБЩЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Представим некоторые, наиболее существенные причинно-следственные связи, вытекающие из анализа результатов моделирования. Анализ результатов моделирования, приведенных в табл. 3, позволяет качественно оценить предполагаемый уровень уязвимости стран и регионов мира к воздействию глобальных угроз при условии, что известны оценки индексов устойчивого развития. В частности, для стран с высокими значениями индексов устойчивого развития (Q, I_{ql}, I_{sec}) характерны высокие значения подындексов экономического (I_e) и социального (I_s) развития (строки 1–10). Можно сказать, что высокий уровень защищенности от детской смертности наблюдается в тех странах, для которых характерными являются высокие или средние показатели индексов устойчивого развития, качества жизни (I_{ql}) и безопасности жизни (I_{sec}) (строки 12–16). Для стран, в которых эти три показателя имеют средний уровень, наблюдается высокая уязвимость к влиянию коррупции (строки 17–18). Если хотя бы один из этих показателей имеет высокое значение, то происходит снижение уязвимости к влиянию коррупции (19–22). Отметим, что для стран с высоким уровнем GDP наблюдается низкий уровень уязвимости к коррупции (строки 24, 25, 28), что дополняет результаты работы [2]. Можно говорить о том, что в странах с высоким или средним уровнем качества и безопасности жизни не возникает проблемы ограничения доступа к питьевой воде (строки 29–35).

Следует отметить, что высокое значение показателей GDP не является гарантией высокого уровня защищенности от глобальных болезней (строка 36), а для стран даже с низким уровнем GDP, но с высокими показателями качества и безопасности жизни характерен высокий уровень защищенности от этой угрозы (строка 37).

Анализ данных табл. 4 позволяет качественно оценить влияние глобальных угроз на уровень устойчивого развития. Установлено, что высокий уровень уязвимости к коррупции свидетельствует о низком значении уровня GDP (строка 1) также, как и сочетание среднего уровня этого показателя с высоким уровнем уязвимости к глобальным болезням (строка 2).

Сочетание высокого уровня защищенности от детской смертности, отсутствия ограничений доступа к питьевой воде, а также среднего уровня уязвимости к коррупции является характерным для стран со средним уровнем значений индекса устойчивого развития (строка 4).

Для стран, где наблюдается сочетание низкого или среднего уровня защищенности от детской смертности и ограниченности доступа к воде с высоким уровнем уязвимости к коррупции, характерен низкий уровень качества жизни (строки 5–9). Если хотя бы один из этих факторов защищенности имеет высокий уровень, то это обеспечивает средний уровень качества жизни (строки 11–14). Только сочетание высокого уровня защищенности от детской смертности, низкого уровня уязвимости к коррупции и высокого уровня доступа к питьевой воде является гарантией высокого уровня качества жизни (строка 15).

Страны, имеющие низкий уровень уязвимости к глобальным болезням и средний уровень уязвимости к коррупции, характеризуются средним уровнем экономического развития (строка 16). Понижение уровня уязвимости к коррупции ведет к высокому уровню экономического развития (строки 17, 18).

Низкий уровень социального благополучия стран обусловлен множеством причин (строки 28–35), к которым относятся и высокий уровень уязвимости к коррупции, и острота проблемы ограничения доступа к питьевой воде, и высокий или средний уровень детской смертности. Если же в стране отсутствует проблема доступа к питьевой воде, то имеет место средний уровень социального благополучия (строки 36–38). Наличие высокого уровня защищенности от детской смертности в сочетании с высоким или средним уровнем доступа к питьевой воде свидетельствует о высоком уровне социального благополучия (строки 39–41).

Высокий уровень уязвимости к коррупции в сочетании со средним и низким уровнями защищенности от детской смертности и от ограничения доступа к питьевой воде свидетельствует о низком уровне безопасности жизни людей (строки 42–44). Повышение уровней защищенности по этим показателям приводит к среднему уровню безопасности жизни людей (строки 45–47). Только высокий уровень защищенности от детской смертности, низкая уязвимость к коррупции и высокий уровень доступа к питьевой воде является гарантией высокого уровня безопасности жизни людей (строка 48).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей статье предложена и апробирована методика применения БСД для качественного анализа зависимостей и установления причинно-следственных связей между уровнями уязвимости стран и регионов мира к воздействию глобальных угроз и индексами устойчивого развития в глобальном контексте.

Введены меры удельной информативности переменной и удельной взаимной информативности переменных, которые можно применять для отбора существенных переменных, а также определения причинно-следственных связей между ними при синтезе топологии БСД. Установлено, что влияние таких угроз, как уязвимость к природным катастрофам, баланс между биологической продуктивностью терри-

тории и суммарным потреблением, неравенство доходов населения, государственная нестабильность на уровень устойчивого развития стран мира является менее существенным по отношению к остальным глобальным угрозам. Поэтому представленные угрозы были исключены из рассмотрения.

Выполнено моделирование БСД для проверки двух типов гипотез. Предложен метод обобщения результатов моделирования, основанный на построении булевой функции для множества наборов свидетельств, что дает возможность использовать методы булевой алгебры для получения минимального множества наборов свидетельств, подтверждающих каждую гипотезу.

В результате анализа обобщенных результатов моделирования установлены новые (по отношению к [1]) закономерности и причинно-следственные связи, определяющие влияние глобальных угроз на уровень устойчивого развития, уровень безопасности и качество жизни людей в разных странах и регионах мира. В частности, установлено, что уровень энергетической безопасности (*ES*) является важным фактором, влияющим на устойчивое развитие, и для стран с высокими показателями *GDP* характерен низкий уровень энергетической безопасности. Уточнено влияние уровня коррупции на качество жизни людей и на экономическое развитие стран. Также установлено, что социальное благополучие людей во многом зависит от воздействия таких угроз, как ограниченность доступа к питьевой воде и детская смертность. Сочетание этих угроз с уязвимостью к коррупции является основным фактором влияния на безопасность жизни людей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аналіз сталого розвитку — глобальний і регіональний контексти: У 2 ч./ Міжнар. Рада з науки (ISCU); наук. кер. М.З. Згуровський, Ч.І. Глобальне моделювання процесів сталого розвитку в контексті якості і безпеки життя людей. — К.: НТУУ «КПІ», 2009. — 280 с.
2. Померанцева Т.Н., Болдак А.А. Многомерный статистический анализ влияния глобальных угроз на безопасность стран мира // Кибернетика и системный анализ. — 2010. — № 2 — С. 37–48.
3. Pearl J. Causality: Models, reasoning, and inference, Cambridge University Press, 2-nd edition, 2009. — 463 p.
4. Richard J. Larsen, Morris L. Marx introduction to mathematical statistics and its applications, 4-th edition. — NY.: Pearson, USA, 2006. — 926 p.
5. Velleman Paul. E. and Leland Wilkinson. Nominal, ordinal, interval, and ratio typologies are misleading // The American Statistician. — 1993. — N 47. — P. 65–73.
6. Hartigan J.A. and Wong M.A. A *k*-means clustering algorithm // Applied Statistics. — 1979. — N 28 — P. 100–108.
7. Айвазян С.А., Енюков И.С., Мешалкин Л.Д. Прикладная статистика: Исследование зависимостей: Справ. изд. / Под ред. С.А. Айвазяна. — М.: Финансы и статистика, 1985. — 487 с.
8. Колмогоров А.Н. Три подхода к определению понятия «количество информации» // Проблемы передачи информации. — 1965. — 1, № 1 — С. 3–11.
9. Габидулин Э.М., Пилипчук Н.И. Лекции по теории информации. — М.: МФТИ, 2007. — 214 с.
10. Шеннон К. Работы по теории информации и кибернетике. — М.: Изд. иностр. лит., 2002. — 830 с.
11. The GeNIe (Graphical Network Interface) software package. — <http://genie.sis.pitt.edu/about.html>
12. Болдак А.А., Невдащенко М.В. Математический аппарат формализации моделей используемых при проектировании информационных систем // Вісник КПІ. Серія «Інформатика, управління та обчислювальна техніка». — 2007. — № 47. — С. 332–345.
13. Марков А.А. Элементы математической логики. — М.: Изд-во МГУ, 1984. — 80 с.

Поступила 17.05.2010