

К. К. Логинов, В. В. Карпов
ОЦЕНКА УРОВНЯ ЭКОНОМИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ
НЕОДНОРОДНОГО МАРКОВСКОГО ПРОЦЕССА

В статье рассматривается подход к оценке стабильности региональной экономики, основанный на неоднородной марковской модели. В системе экономической безопасности региона выделяются стабильные состояния, которые можно упорядочить по некоторому уровню стабильности, а также набор нестабильных состояний, характеризующийся неким уровнем отклонения от стабильных состояний (при этом нестабильные состояния тоже можно упорядочить по некоторому уровню). В модели задаются переходы системы между состояниями под воздействием набора внешних и внутренних угроз экономической безопасности в форме неоднородного марковского процесса. К одной из главных особенностей модели можно отнести зависимость интенсивностей переходов от объема бюджетных денежных средств, необходимых для мониторинга уровня экономической безопасности и направленных на ликвидацию потенциальных угроз или на смягчение их действия. Кроме того, в модели учитывается тот факт, что выделение денежных средств на развертывание некоторых мероприятий не приносит мгновенного эффекта, т.е. интенсивности переходов из нестабильного состояния в стабильное пропорциональны промежутку времени, считая от момента поступления бюджетных средств. В работе на основе метода Монте-Карло описан алгоритм моделирования смены состояний рассматриваемого случайного процесса на конечном промежутке времени и вычисления финальных вероятностей состояний. Полученные результаты могут использоваться органами региональной власти в качестве инструмента прогнозирования уровня экономической безопасности, а также при планировании комплекса мероприятий, направленных на поддержание стабильности системы экономической безопасности.

Ключевые слова: экономическая безопасность, интегральный индекс, финальное распределение, неоднородный марковский случайный процесс, метод Монте-Карло.

Работа выполнена в рамках государственного задания Омского научного центра СО РАН (номер госрегистрации проекта 121022000112-2).

Исследования, посвященные обеспечению экономической безопасности, давно занимают важное место в экономической науке как на федеральном, так и на региональном уровне. Данные исследования охватывают большое число сфер экономической деятельности предприятий и домохозяйств, а также социальной жизни общества. Особенно острой проблема обеспечения экономической безопасности становится в кризисные периоды, а с учетом современной напряженной политической и эпидемиологической обстановки этот вопрос остается весьма актуальным. Большинство работ отечественных авторов посвящены разработке систем индикаторов экономической безопасности, отражающих сильные и слабые стороны региональной экономики в различных сферах, и их пороговых значений [1; 2; 4; 6; 12; 19], а также построению методик мониторинга уровня экономической безопасности, среди которых центральное место занимает метод сравнения индикаторов с их пороговыми значениями [5; 11; 15], на основе которого дается характеристика состояния региональной экономической безопасности. Также широкий перечень работ направлен на построение интегрального индекса экономической безопасности,

представляющего из себя взвешенную сумму нормированных (безразмерных) значений индикаторов и дающего комплексное представление об экономической ситуации в регионе [8; 22; 24], а также позволяющий сопоставлять уровень социально-экономического развития различных регионов. Наибольшее значение в вопросе вычисления интегрального индекса имеет выбор метода расчета весовых коэффициентов среди экспертных [22] и статистических методов [8; 24]. Немало статей посвящено составлению прогнозных сценариев обеспечения экономической безопасности. Среди подходов к прогнозированию отдельных индикаторов либо интегрального индекса в целом можно выделить методы адаптивной фильтрации [13] и применение различных модификаций модели авторегрессии и проинтегрированного скользящего среднего (ARIMA), использующие в качестве входных данных временные ряды по индикаторам за некоторый промежуток времени (ретроспективные данные официальной статистики) [10]. Экономическая система постоянно находится под влиянием внутренних и внешних угроз, и модели, основанные на временных рядах, не всегда способны в полной мере учитывать сильные воздействия случайных факторов (хотя это частично учитывается

в так называемых моделях с интервенцией). Кроме того, упомянутые выше подходы не позволяют рассчитать вероятности наступления многочисленных угроз, снижающих уровень безопасности, и, соответственно, вероятности нахождения системы экономической безопасности в некоторых стабильных состояниях, не приводящих к негативным последствиям социально-экономического развития региона. Данные вопросы продолжают рассматриваться в отечественной литературе, что свидетельствует об актуальности этого направления. В частности, в работах [14; 17; 23] рассмотрен подход к вычислению вероятностей реализации угроз, основанный на экспертных оценках. Среди работ, в которых используются данные официальной статистики, стоит отметить работу [7], однако в ней приведена лишь методика расчета вероятностей роста и снижения угроз. Настоящая работа является продолжением и некоторым обобщением модели, представленной в предыдущей работе авторов [9], и призвана частично решить указанные выше проблемы.

Рассмотрим систему региональной экономической безопасности S , характеризующую одну или несколько сфер экономической безопасности, например, сферу реальной экономики, социальную, денежно-финансовую сферу и др. Полагаем, что состояния системы S задаются множеством $\{S_1, \dots, S_k, S_{k+1}, \dots, S_n\}$, где n – общее количество состояний системы; k – число стабильных состояний, $S_1, \dots, S_k$ – стабильные (или надежные в некотором смысле) состояния; $S_{k+1}, \dots, S_n$ – нестабильные (опасные) состояния. Стабильным состояниям $S_1, \dots, S_k$ в зависимости от целей и задач исследования можно давать различную интерпретацию. В качестве примера под стабильными состояниями можно понимать такие состояния, при которых значения всех индикаторов рассматриваемой сферы находятся в заранее известных приемлемых пределах для каждого состояния (например, из стратегии социально-экономического развития региона), а в качестве нестабильных – состояния, при которых все или часть индикаторов выходят за границы допустимых интервалов. Однако при комплексной оценке уровня экономической безопасности, включающей несколько сфер социально-экономического развития региона, целесообразнее сопоставить состояниям S_i , $i = 1, \dots, n$, некоторые диапазоны значений интегрального индекса экономической безопасности:

$$I = \sum_{l=1}^m w_l \bar{x}_l, \quad 0 \leq w_l \leq 1, \quad \sum_{l=1}^m w_l = 1,$$

где m – общее число индикаторов в системе экономической безопасности; w_l – весовой

коэффициент, отражающий степень значимости индикатора с номером l ; $\bar{x}_l$ – нормированное (приведенное к безразмерному виду) значение индикатора; $l = 1, \dots, m$. Обычно для приведения индикаторов к безразмерному виду используются различные нормировки вида $\bar{x}_l = f(x_l, a_l)$, где a_l – пороговое значение индикатора с номером l . В результате такой нормировки значение $\bar{x}_l$ интерпретируется как степень достижения индикатором своего порогового значения. При использовании нормировки, представленной в работе [11], пороговое значение интегрального индекса равно единице, выражение $I < 1$ свидетельствует о негативном состоянии системы экономической безопасности, а неравенство $I > 1$ – об относительно стабильном состоянии. Приведем пример определения состояний системы S_i , $i = 1, \dots, n$, основываясь на диапазонах изменения значений интегрального индекса I , для пяти стабильных ($k = 5$) и пяти нестабильных ($n = 10$) состояний:

- *Стабильные состояния*
 - S_1 : значение интегрального индекса $I \geq 1$;
 - S_2 : значение интегрального индекса лежит в полуинтервале $0.95 \leq I < 1$;
 - S_3 : значение интегрального индекса $0.9 \leq I < 0.95$;
 - S_4 : значение интегрального индекса $0.85 \leq I < 0.9$;
 - S_5 : значение интегрального индекса $0.8 \leq I < 0.85$;
- *Нестабильные состояния*
 - S_6 : $0.6 \leq I < 0.8$;
 - S_7 : $0.4 \leq I < 0.6$;
 - S_8 : $0.3 \leq I < 0.4$;
 - S_9 : $0.2 \leq I < 0.3$;
 - S_{10} : $0 \leq I < 0.2$.

Следует отметить, что указанный пример, конечно, носит условный характер, и в каждом конкретном случае определение состояний системы зависит от рассмотрения определенных сфер экономической деятельности, целей оценки уровня экономической безопасности, необходимой степени детализации результатов и т.д.

Пусть переменная t означает время, выраженное в заданных единицах измерения. Полагаем, что на систему S непрерывно воздействуют внешние и внутренние угрозы (или их объединение) с интенсивностями $\lambda_{ij}(t) \geq 0$ (размерность t^{-1}), которые переводят систему из состояния S_i в S_j , $i, j = 1, \dots, n$, $i \neq j$. Предполагаем, что переход системы из одного состояния в другое осуществляется в случайные моменты времени и

будущее состояние системы зависит только от достигнутого в данный момент времени состояния и не зависит от развития системы в прошлом (выполнено марковское свойство). Вероятности переходов системы между состояниями за бесконечно малый промежуток времени $(t; t + h)$, $h \rightarrow +0$, задаем следующим образом:

$$P(S(t+h) = S_j | S(t) = S_i) = \lambda_{ij}(t)h + o(h), \quad j \neq i,$$

$$P(S(t+h) = S_i | S(t) = S_i) = 1 - \sum_{j=1, j \neq i}^n \lambda_{ij}(t)h + o(h).$$

Вероятности двух и более переходов имеют порядок $o(h)$. Таким образом, по построению система S описывается неоднородным марковским случайным процессом с множеством состояний $\{S_i\}_{i=1}^n$ и непрерывным временем. На рис. 1 представлен пример схемы переходов (граф состояний) системы S с тремя стабильными состояниями ($k = 3$) и двумя нестабильными состояниями ($n = 5$).

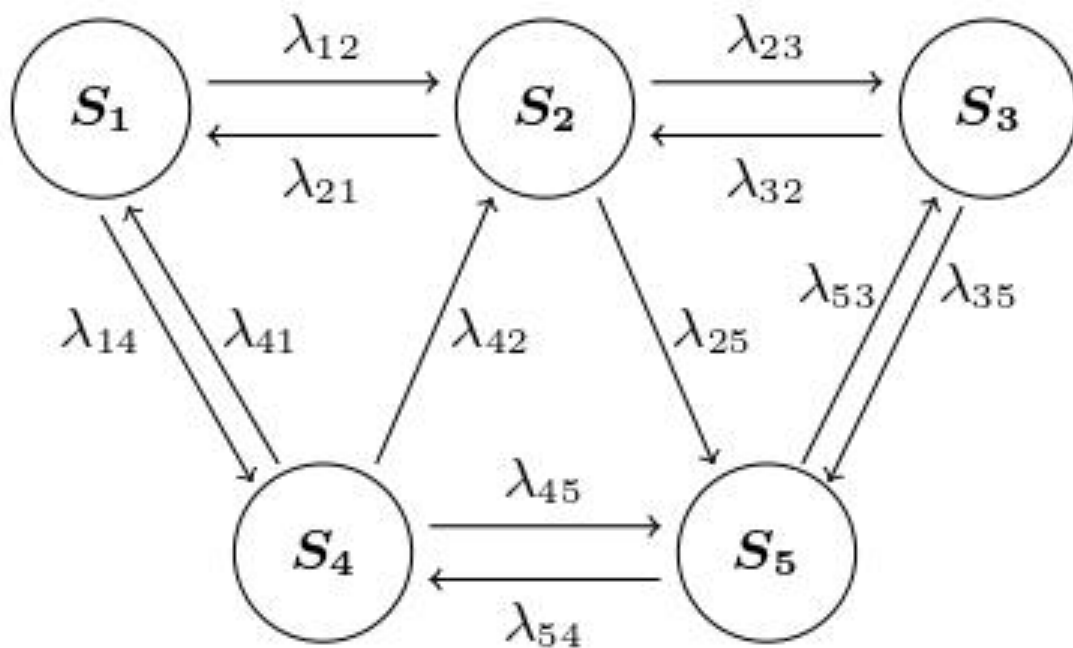


Рис. 1. Схематическое представление модели с тремя стабильными и двумя нестабильными состояниями

Обозначим $p_i(t) \geq 0$ — вероятность нахождения системы S в состоянии S_i в момент времени $t \geq 0$, $\sum_{i=1}^n p_i(t) = 1$. Как известно, при заданном графе состояний для вероятностей $p_i(t)$ можно записать систему дифференциальных уравнений Колмогорова [21]:

$$\frac{dp_i(t)}{dt} = \sum_{j=1, j \neq i}^n p_j(t)\lambda_{ji}(t) - p_i(t) \sum_{j=1, j \neq i}^n \lambda_{ij}(t), \quad i = 1, \dots, n,$$

с начальными условиями $p_i(t_0) = p_i^{(0)} \geq 0$, $\sum_{i=1}^n p_i^{(0)} = 1$. В частности, если $p_i^{(0)} = 1$, $p_j^{(0)} = 0$, $j = 1, \dots, n$, $j \neq i$, то система S в начальный момент времени $t = t_0$ находится в состоянии S_i . Следует отметить, что в общем случае аналитическое решение уравнений Колмогорова может представлять собой достаточно сложную задачу.

Далее предположим, что подразделение органов исполнительной власти, отвечающее за мониторинг уровня экономической безопасности, располагает некоторым ограниченным объемом бюджетных денежных средств, направляемых на поддержание стабильного состояния системы экономической безопасности и отражение различных внешних и внутренних угроз. Условимся, что бюджет пополняется на некоторую постоянную величину в строго определенные моменты времени (отчетные периоды). Пусть $B(t)$ — объем бюджетных средств, имеющихся в момент времени t (приведенный к безразмерному виду), причем $B(t_0) = B_0 > 0$ — заданная константа. Определим детерминированную последовательность моментов времени $\{t_q^{(B)}\}_{q=0}^{\infty}$, в которые пополняется объем бюджетных средств. Без ограничения общности считаем, что

$$t_0^{(B)} = t_0, \quad t_{q+1}^{(B)} = t_q^{(B)} + 1, \quad q = 0, 1, 2, \dots$$

Объем бюджетных денежных средств изменяется следующим образом:

$$B(t_{q+1}^{(B)}) = B(t_q^{(B)}) + \Delta^{(B)} - \delta_i(t_q^{(B)}), \quad q = 0, 1, 2, \dots,$$

где $\Delta^{(B)} > 0$ (безразмерная величина) – заданная положительная константа, $0 \leq \delta_i(t_q^{(B)}) \leq B(t_q^{(B)})$ – объем бюджетных средств, выделяемых для стабилизации системы в зависимости от состояния S_i , $i = 1, \dots, n$.

Интенсивности переходов $\lambda_{ij}(t)$ из стабильных состояний S_i , $i = 1, \dots, k$, в нестабильные состояния S_j , $j = k + 1, \dots, n$, будем задавать следующим образом:

$$\lambda_{ij}(t) = \frac{\alpha_{ij}}{1 + \delta_i(t_q^{(B)})}, \quad t \in [t_q^{(B)}; t_{q+1}^{(B)}), \quad q = 0, 1, 2, \dots,$$

где $\alpha_{ij} > 0$ (размерность t^{-1}) – интенсивность внешнего воздействия на систему при отсутствии выделения средств со стороны подразделения органов исполнительной власти, осуществляющего мониторинг состояния региональной экономической безопасности ($\delta_i(t_q^{(B)}) = 0$). Смысл такого задания интенсивностей выхода системы из стабильных состояний заключается в следующем: с учетом постоянного действия на систему внешних и внутренних угроз при выделении определенной суммы денежных средств (величины $\delta_i(t_q^{(B)})$) снижается общая интенсивность $A_i = \sum_{j=k+1}^n \alpha_{ij}$ перехода системы в какое-либо нестабильное состояние (среднее время выхода системы из стабильных состояний S_i , $i = 1, \dots, k$, увеличивается), т.е. мы стремимся как можно дольше оставить систему S в одном из стабильных состояний. Спонтанные переходы системы между стабильными состояниями зададим некоторыми константами $\lambda_{ij}(t) = \alpha_{ij}^{(s)} > 0$, $i, j = 1, \dots, k$, $i \neq j$.

Интенсивности переходов $\lambda_{ji}(t)$ системы из нестабильных состояний S_j , $j = k + 1, \dots, n$, в стабильные состояния S_i , $i = 1, \dots, k$, будем считать в отличие от предыдущего случая пропорциональными выделяемому на борьбу с угрозами объему денежных средств:

$$\beta_{ji}(t) = b_{ji} \delta_j(t_q^{(B)}) (t - t_q^{(B)}) + \mu_{ji}, \quad t \in [t_q^{(B)}; t_{q+1}^{(B)}), \quad q = 0, 1, 2, \dots,$$

где $b_{ji} > 0$ – коэффициент пропорциональности (размерность t^{-1}), выражающий эффект от вложения денежных средств, константа $\mu_{ji} > 0$ (размерность t^{-1}) – интенсивность спонтанного перехода из S_j в S_i . В приведенной выше формуле также учитывается тот факт, что выделение

денежных средств не приносит мгновенного эффекта, т.е. интенсивности переходов из нестабильного состояния в стабильное пропорциональны промежутку времени, считая от момента выделения бюджетных средств. Спонтанные переходы системы S между нестабильными состояниями задаем некоторыми константами $\lambda_{ji}(t) = \beta_{ji}^{(s)} > 0$, $i, j = k + 1, \dots, n$, $i \neq j$.

В практических расчетах значения интенсивностей $\alpha_{ij}^{(s)}$, $\beta_{ji}^{(s)}$ обычно полагают равными частотам соответствующих переходов. Например, выражение $\beta_{54}^{(s)} = 5 \text{ год}^{-1}$ (см. рис. 1) означает, что спонтанный переход системы S из нестабильного состояния S_5 в состояние S_4 , происходит в среднем 5 раз в год (при этом среднее время до перехода составляет $\frac{1}{\beta_{54}^{(s)}} = 0.2$ года).

Пусть существуют конечные пределы:

$$p_i^* = \lim_{t \rightarrow +\infty} p_i(t), \quad i = 1, \dots, n, \quad \sum_{i=1}^n p_i^* = 1.$$

Вероятности p_i^* , не зависящие от начального состояния системы, называются финальными вероятностями состояний (соответствующее распределение $\{p_i^*\}_{i=1}^n$ называется стационарным распределением). Как известно [18], если для случайного процесса с конечным множеством состояний выполнено условие, заключающееся в том, что вероятность перехода из каждого состояния в любое другое за конечное число шагов положительна, то финальное распределение вероятностей существует. Следовательно, при $t \rightarrow +\infty$ в системе S устанавливается предельный стационарный режим, при котором вероятности пребывания системы в определенных состояниях не зависят от времени. Так как $\alpha_{ij} > 0$, $\alpha_{ij}^{(s)} > 0$, $\mu_{ji} > 0$, $\beta_{ji}^{(s)} > 0$ для соответствующих индексов i , j , то все состояния системы S являются сообщающимися (и в системе нет поглощающих и периодических состояний), следовательно, стационарное распределение $\{p_i^*\}_{i=1}^n$ существует.

Следует отметить, что в общем случае нахождение финальных вероятностей пребывания системы в различных состояниях $\{p_i^*\}_{i=1}^n$ представляет собой очень трудную задачу. Однако для численного решения можно применить метод Монте-Карло [3; 16], моделируя процесс смены состояний на конечном (достаточно большом) промежутке времени. Тогда финальные вероятности p_i^* оцениваются как отношение

времени пребывания системы в состоянии S_i к общему промежутку моделирования [9].

Для моделирования переходов системы S между состояниями необходимо моделировать время до ближайшего перехода. Пусть ξ_{ij} – случайная величина, означающая промежуток времени до ближайшего перехода системы из состояния S_i в S_j ; $\xi_i = \min_{j \neq i} \{\xi_{ij}\}$ – промежуток времени до ближайшего перехода из S_i в какое-либо из состояний S_j , $i, j = 1, \dots, n, i \neq j$.

Учитывая, что интенсивности спонтанных переходов между стабильными состояниями являются постоянными, имеем, что случайные величины ξ_{ij} при $i, j = 1, \dots, k, i \neq j$, имеют экспоненциальный закон распределения с параметром $\alpha_{ij}^{(s)} > 0$:

$$P(\xi_{ij} > t) = e^{-\alpha_{ij}^{(s)} t}, \quad t \geq 0.$$

Выражение $E\xi_{ij} = \frac{1}{\alpha_{ij}^{(s)}}$ означает математическое ожидание случайной величины ξ_{ij} и интерпретируется как среднее время до перехода системы S из состояния S_i в S_j , считая от некоторого фиксированного t . Аналогично случайные величины ξ_{ij} при $i, j = k+1, \dots, n, i \neq j$ (переходы между нестабильными состояниями), имеют экспоненциальное распределение с параметром $\beta_{ij}^{(s)} > 0$.

Интенсивности $\lambda_{ij}(t)$, $\lambda_{ji}(t)$ перехода системы из стабильных состояний S_i и нестабильных состояний S_j , $i = 1, \dots, k, j = k+1, \dots, n$, являются переменными, поэтому случайные величины ξ_{ij} и ξ_{ji} , имеют при фиксированном t обобщенное экспоненциальное распределение:

$$\begin{aligned} P(\xi_{ij} > a | t) &= \exp\left(-\int_t^{t+a} \lambda_{ij}(u) du\right), \\ a &\geq 0, \\ P(\xi_{ji} > a | t) &= \exp\left(-\int_t^{t+a} \lambda_{ji}(u) du\right), \\ a &\geq 0. \end{aligned}$$

Опишем алгоритм моделирования переходов системы S между состояниями (иногда называемый алгоритмом Гиллеспи). Обозначим промежуток моделирования $[0; a_{mod}]$, $a_{mod} > 0$. Пусть $\gamma \sim Unif(0,1)$ – выборочное значение случайной величины, равномерно распределенной в интервале $(0; 1)$. При этом на каждом шаге алгоритма будем считать, что используется новое случайное число γ . Ниже приведено описание алгоритма

моделирования одной траектории (процесса смены состояний) на промежутке $[0; a_{mod}]$.

1. Разыгрывание начального состояния системы $S(t_0)$ согласно начальному распределению $\{p_i^{(0)}\}$:

$$S(t_0) = S_i: \sum_{r=1}^{i-1} p_r^{(0)} < \gamma \leq \sum_{r=1}^i p_r^{(0)}.$$

2. Моделирование ближайшего момента времени до смены состояния (метод обратной функции распределения [16]):

$t_{l+1} = t_l + \xi_i$, $l = 0, 1, 2, \dots$, $\xi_i = \min_{j \neq i} \{\xi_{ij}\}$, при этом величина ξ_i ищется из уравнения

$$\int_{t_l}^{t_l + \xi_i} Q_i(u) du = -\ln \gamma, \quad Q_i(u) = \sum_{j=1, j \neq i}^n \lambda_{ij}(u).$$

Если $t_{l+1} \geq a_{mod}$, то завершаем моделирование.

3. Получение следующего состояния $S(t_{l+1}) = S_j$, в которое переходит система из S_i , $j \neq i$, согласно распределению $\left\{\frac{\lambda_{ij}(t_{l+1})}{Q_i(t_{l+1})}\right\}$:

$$\begin{aligned} S(t_{l+1}) = S_j: \sum_{r=1, r \neq i}^{j-1} \lambda_{ir}(t_{l+1}) &< \gamma Q_i(t_{l+1}) \\ &\leq \sum_{r=1, r \neq i}^j \lambda_{ir}(t_{l+1}). \end{aligned}$$

Далее переход на шаг 2.

Для получения точечных оценок $\bar{p}_i^*$ финального распределения по описанному выше алгоритму моделируется $N \gg 1$ траекторий, и вычисляется время пребывания системы S в каждом из состояний S_i , $i = 1, \dots, n$, на промежутке моделирования $[0; a_{mod}]$ для каждой траектории. В результате получаем матрицу времени пребывания системы в различных состояниях размера $n \times N$:

$$T = \begin{pmatrix} T_{11} & T_{12} & \dots & T_{1N} \\ T_{21} & T_{22} & \dots & T_{2N} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ T_{n1} & T_{n2} & \dots & T_{nN} \end{pmatrix},$$

где элемент T_{id} означает пребывание системы S в состоянии S_i при моделировании траектории под номером d , $i = 1, \dots, n, d = 1, \dots, N$. Тогда точечные оценки $\bar{p}_i^*$ финальных вероятностей состояний вычисляются по формуле:

$$\bar{p}_i^* = \frac{\sum_{d=1}^N T_{id}}{N a_{mod}}, \quad i = 1, \dots, n.$$

Таким образом, мы получаем среднее время нахождения системы экономической безопасности в каждом из состояний S_i , $i = 1, \dots, n$. Следовательно, с использованием имитационного моделирова-

ния возможно прогнозировать время нахождения системы в стабильных состояниях в зависимости от проводимых административных мероприятий, которыми в данной модели выступают объемы бюджетных денежных средств, выделяемых на отражение внутренних и внешних угроз в начале каждого отчетного периода. В заключение отметим, что внесение новых механизмов в формирование переходов системы между состояниями принципиально не меняет схему моделирования, но, конечно, в каждом конкретном случае необходимо индивидуально исследовать граф состояний, законы перехо-

да системы между состояниями, и, соответственно, представленный в работе алгоритм можно модифицировать с различной степенью детализации. В частности, данное обстоятельство является очень важным при переходе к полумарковским и немарковским случайным процессам. Полученные результаты могут использоваться органами региональной власти в качестве инструмента прогнозирования уровня экономической безопасности, а также при планировании комплекса мероприятий, направленных на поддержание стабильности системы экономической безопасности.

Библиографический список

1. Гайфуллин, А. Ю. Методический подход к оценке социальной безопасности региона / А. Ю. Гайфуллин, М. М. Гайфуллина. – Текст : непосредственный // Фундаментальные исследования. – 2015. – № 12 (5). – С. 1001-1006.
2. Гордиевич, Т. И. Уровень жизни и динамика доходов населения / Т. И. Гордиевич, П. В. Рузанов. – Текст : непосредственный // Омский научный вестник. Серия «Общество. История. Современность». – 2020. – № 1. – С. 127-135.
3. Ермаков, С. М. Курс статистического моделирования / С. М. Ермаков, Г. А. Михайлов. – Москва : Наука, 1976. – 320 с. – Текст : непосредственный.
4. Казанцев, С. В. Экономическая безопасность и оценка экономической защищенности территории / С. В. Казанцев. – Текст : непосредственный // Регион: Экономика и Социология. – 2010. – № 3. – С. 40-56.
5. Капогузов, Е. А. Социально-демографические факторы обеспечения региональной экономической безопасности (по материалам Омской области) / Е. А. Капогузов, Р. И. Чупин, М. С. Харламова, А. С. Цатурян. – Текст : непосредственный // Актуальные проблемы экономики и права. – 2019. – № 4. – С. 1605-1619.
6. Кашник, О. И. Социальная безопасность: теоретические аспекты / О. И. Кашник, А. А. Брызгалина. – Текст : непосредственный // Образование и наука. – 2013. – № 3 (102). – С. 101.
7. Литвиненко, А. Н. Оценка вероятности роста угроз экономической безопасности на основе построения классификационных функций / А. Н. Литвиненко, А. В. Грачев, С. И. Тарашнина, И. И. Бритвина. – Текст : непосредственный // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия Экономика. Социология. Менеджмент. – 2019. – Т. 9. – № 2 (31). – С. 129-147.
8. Логинов, К. К. Вычисление весовых коэффициентов в интегральном индексе экономической безопасности региона на примере Омской области / К. К. Логинов. – Текст : непосредственный // Наука о человеке: гуманитарные исследования. – 2020. – № 1 (39). – С. 186-194.
9. Логинов, К. К. Оценка финального распределения вероятностей реализации угроз в сфере экономической безопасности с применением имитационного моделирования / К. К. Логинов, В. В. Карпов, А. А. Кораблева. – Текст : непосредственный // Вестник Сибирского института бизнеса и информационных технологий. – 2021. – Т. 10. – № 1. – С. 67-75.
10. Логинов, К. К. Прогнозирование индикаторов экономической безопасности Омской области в среднесрочной перспективе / К. К. Логинов, А. А. Кораблева, В. В. Карпов. – Текст : непосредственный // Наука о человеке: гуманитарные исследования. – 2018. – № 4 (34). – С. 174-182.
11. Логинов, К. К. Экономическая безопасность регионов Сибирского федерального округа / К. К. Логинов, А. А. Кораблева, В. В. Карпов. – Текст : непосредственный // Наука о человеке: гуманитарные исследования. – 2018. – № 1 (31). – С. 141-150.
12. Любушин, Н. П. Экономический анализ уровня конкурентоспособности региона с использованием показателей экономической безопасности / Н. П. Любушин, Е. Е. Козлова, О. Г. Черкасова. – Текст : непосредственный // Экономический анализ: теория и практика. – 2012. – № 23 (278). – С. 2-13.
13. Митяков, Е. С. Использование алгоритмов адаптивной фильтрации для прогнозирования экономической динамики / Е. С. Митяков, В. А. Сазонтов. – Текст : непосредственный // Труды НГТУ им. Р. Е. Алексеева. – 2012. – № 2 (95). – С. 339-344.

14. Митяков, Е. С. Оценка рисков в задачах мониторинга угроз экономической безопасности / Е. С. Митяков, С. Н. Митяков. – Текст : непосредственный // Труды НГТУ им. Р. Е. Алексеева. – 2018. – № 1 (120). – С. 44-51.
 15. Митяков, С. Н. Экономическая безопасность регионов Приволжского федерального округа / С. Н. Митяков, Е. С. Митяков, Н. А. Романова. – Текст : непосредственный // Экономика региона. – 2013. – № 3 (35). – С. 81-91.
 16. Михайлов, Г. А. Численное статистическое моделирование. Методы Монте-Карло / Г. А. Михайлов, А. В. Войтишек. – Москва : Академия, 2006. – 368 с. – Текст : непосредственный.
 17. Наумова, О. А. Методика мониторинга финансовой безопасности экономического субъекта на основе оценки риска наступления финансовых угроз / О. А. Наумова, М. А. Тюгин. – Текст : непосредственный // Вектор науки ТГУ. Серия: Экономика и управление. – 2018. – № 2 (33). – С. 34-41.
 18. Севастьянов, Б. А. Ветвящиеся процессы / Б. А. Севастьянов. – Москва : Наука, 1971. – 436 с. – Текст : непосредственный.
 19. Сенчагов, В. К. Инновационные преобразования как императив экономической безопасности региона: система индикаторов / В. К. Сенчагов, Ю. М. Максимов, С. Н. Митяков, О. И. Митякова. – Текст : непосредственный // Инновации. – 2011. – № 5. – С. 56-61.
 20. Соболева, С. В. Демографическая безопасность регионов Сибирского федерального округа: оценка рисков / С. В. Соболева, Н. Е. Смирнова, О. В. Чудаева. – Текст : непосредственный // Вестник НГУЭУ. – 2016. – № 1. – С. 10-21.
 21. Тихонов, В. И. Марковские процессы / В. И. Тихонов, М. А. Миронов. – Москва : Советское радио, 1977. – 488 с. – Текст : непосредственный.
 22. Тупикина, Е. Н. Разработка интегрального индикатора экономической безопасности региона (на примере Дальневосточного федерального округа) / Е. Н. Тупикина, Е. В. Кочева, Н. А. Матев. – Текст : непосредственный // Национальные интересы: приоритеты и безопасность. – 2013. – Т. 9. – № 46 (235). – С. 38-43.
 23. Фалинский, И. Ю. Рейтинговый состав угроз развитию региональной экономики: экспертная оценка / И. Ю. Фалинский. – Текст : непосредственный // Инновации и инвестиции. – 2015. – № 3. – С. 142-145.
- Френкель, А. А. Влияние весовых коэффициентов на рейтинг регионов по уровню инновационного потенциала / А. А. Френкель, Н. Н. Волкова, Э. И. Романюк. – Текст : непосредственный // Регион: экономика и социология. – 2013. – № 1 (77). – С. 144-172.

References

1. Ermakov S. M., Mikhailov G. A. *Kurs statisticheskogo modelirovaniya* [Statistical modeling course]. Moscow, Nauka, 1976, 320 p.
2. Falinskii I. Yu. *Reitingovyi sostav ugroz razvitiyu regional'noi ekonomiki: ekspertnaya otsenka* [Rating composition of threats to the development of the regional economy: expert estimation]. *Innovatsii i investitsii* [Innovation and investment]. 2015, no. 3, pp. 142-145.
3. Frenkel A. A., Volkova N. N., Romanyuk E. I. *Vliyanie vesovykh koeffitsientov na reiting regionov po urovnyu innovatsionnogo potentsiala* [Weighing coefficients and innovation potential ratings in regions]. *Region: ekonomika i sotsiologiya* [Region: economics and sociology]. 2013, no. 1 (77), pp. 144-172.
4. Gaifullin A. Yu., Gaigullina M. M. *Metodicheskii podkhod k otsenke sotsial'noi bezopasnosti regiona* [Methodological approach to estimation the social security of the region]. *Fundamental'nye issledovaniya* [Basic Research]. 2015, no. 12 (5), pp. 1001-1006.
5. Gordievich T. I., Ruzanov P. V. *Uroven' zhizni i dinamika dokhodov naseleniya* [Standard of living and income dynamics of the population]. *Omskii nauchnyi vestnik. Seriya «Obshchestvo. Istoriya. Sovremennost'»* [Omsk scientific herald. Series «Society. Story. Modernity»]. 2020, no. 1, pp. 127-135.
6. Kapoguzov E. A., Chupin R. I., Kharlamova M. S., Tsaturyan A. S. *Sotsial'no-demograficheskie faktory obespecheniya regional'noi ekonomicheskoi bezopasnosti (po materialam Omskoi oblasti)* [Socio-demographic factors for ensuring regional economic security (based on materials from the Omsk region)]. *Aktual'nye problemy ekonomiki i prava* [Actual problems of economics and law]. 2019, no. 4, pp. 1605-1619.
7. Kashnik O. I., Bryzgalina A. A. *Sotsial'naya bezopasnost': teoreticheskie aspekty* [Social Security: Theoretical Aspects]. *Obrazovanie i nauka* [Education and science]. 2013, no. 3 (102), p. 101.

8. Kazantsev S. V. *Ekonomicheskaya bezopasnost' i otsenka ekonomicheskoi zashchishchennosti territorii* [Economic security and estimation of the economic security of the territory]. Region: Ekonomika i Sotsiologiya [Region: Economics and Sociology]. 2010, no. 3, pp. 40-56.
9. Litvinenko A. N., Grachev A. V., Tarashnina S. I., Britvina I. I. *Otsenka veroyatnosti rosta ugroz ekonomicheskoi bezopasnosti na osnove postroeniya klassifikatsionnykh funktsii* [Estimation of the probability of growth for the threats of economic security based on classification functions]. Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya ekonomika, sotsiologiya, menedzhment [Bulletin of South-West state university. Series economics, sociology, management]. 2019, vol. 9, no. 2 (31), pp. 129-147.
10. Loginov K. K., Korableva A. A., Karpov V. V. *Ekonomicheskaya bezopasnost' regionov Sibirskogo federal'nogo okruga* [Economic security of the Siberian federal district regions]. Nauka o cheloveke: gumanitarnye issledovaniya [Human science: humanitarian researches]. 2018, no. 1 (31), pp. 141-150.
11. Loginov K. K., Korableva A. A., Karpov V. V. *Prognozirovanie indikatorov ekonomicheskoi bezopasnosti Omskoi oblasti v srednesrochnoi perspektive* [Forecasting indicators of economic safety of the Omsk region in the medium-term perspective]. Nauka o cheloveke: gumanitarnye issledovaniya [Human science: humanitarian researches]. 2018, no. 4 (34), pp. 174-182.
12. Loginov K. K., Karpov V. V., Korableva A. A. *Otsenka final'nogo raspredeleniya veroyatnostei realizatsii ugroz v sfere ekonomicheskoi bezopasnosti s primeneniem imitatsionnogo modelirovaniya* [Estimation of final distribution of probabilities of threats realization in the sphere of economic security based on simulation modeling]. Vestnik Sibirskogo instituta biznesa i informatsionnykh tekhnologii [Herald of the Siberian institute of business and information technologies]. 2021, vol. 10, no. 1, pp. 67-75.
13. Loginov K. K. *Vychislenie vesovykh koeffitsientov v integral'nom indekse ekonomicheskoi bezopasnosti regiona na primere Omskoi oblasti* [Calculation of weight coefficients in the integral index of economic security of the region in terms of Omsk region]. Nauka o cheloveke: gumanitarnye issledovaniya [Human science: humanitarian researches]. 2020, no. 1 (39), pp. 186-194.
14. Lyubushin N. P., Kozlova E. E., Cherkasova O. G. *Ekonomicheskii analiz urovnya konkurentosposobnosti regiona s ispol'zovaniem pokazatelei ekonomicheskoi bezopasnosti* [Economic analysis of the level of competitiveness of the region using indicators of economic security]. Ekonomicheskii analiz: teoriya i praktika [Economic analysis: theory and practice]. 2012, no. 23 (278), pp. 2-13.
15. Mikhailov G. A., Voitishchek A. V. *Chislennoe statisticheskoe modelirovanie. Metody Monte-Karlo* [Numerical statistical modeling. Monte Carlo methods]. Moscow, Akademiya, 2006, 368 p.
16. Mityakov E. S., Mityakov S. N. *Otsenka riskov v zadachakh monitoringa ugroz ekonomicheskoi bezopasnosti* [Assessment of risks in problems of monitoring of threats of economic security]. Trudy NGTU im. R. E. Alekseeva [Proceedings of Nizhny Novgorod state technical university n.a. R. E. Alekseev]. 2018, no. 1 (120), pp. 44-51.
17. Mityakov E. S., Sazontov V. A. *Ispol'zovanie algoritmov adaptivnoi fil'tratsii dlya prognozirovaniya ekonomicheskoi dinamiki* [Application of adaptive filtration algorithms to forecast economic dynamics]. Trudy NGTU im. R. E. Alekseeva [Proceedings of Nizhny Novgorod state technical university n.a. R. E. Alekseev]. 2012, no. 2 (95), pp. 339-344.
18. Mityakov S. N., Mityakov E. S., Romanova N. A. *Ekonomicheskaya bezopasnost' regionov Privolzhskogo federal'nogo okruga* [The economic security of the Volga federal district regions]. Ekonomika regiona [Economy of the region]. 2013, no. 3 (35), pp. 81-91.
19. Naumova O. A., Tyugin M. A. *Metodika monitoringa finansovoi bezopasnosti ekonomicheskogo subekta na osnove otsenki riska nastupleniya finansovykh ugroz* [The technique of monitoring the financial security of the economic entity based on the assessment of financial threatening risk]. Vektor nauki TGU. Seriya ekonomika i upravlenie [Vector of science of Togliatti State University. Series economics and management]. 2018, no. 2 (33), pp. 34-41.
20. Senchagov V. K., Maksimov Yu. M., Mityakov S. N., Mityakova O. I. *Innovatsionnye preobrazovaniya kak imperativ ekonomicheskoi bezopasnosti regiona: sistema indikatorov* [Innovative transformations as an imperative for the economic security of the region: a system of indicators]. Innovatsii [Innovation]. 2011, no. 5, pp. 56-61.
21. Sevastianov B. A. *Vetvyashchiesya protsessy* [Branching processes]. Moscow, Nauka, 1971, 436 p.
22. Soboleva S. V., Smirnova N. E., Chudaeva O. V. *Demograficheskaya bezopasnost' regionov Sibirskogo federal'nogo okruga: otsenka riskov* [Demographic security of the regions of the Siberian federal district: risk assessment]. Vestnik NGUEU [Herald of NGUEU]. 2016, no. 1, pp. 10-21.
23. Tikhonov V. I., Mironov M. A. *Markovskie protsessy* [Markov processes]. Moscow, Sovetskoe radio, 1977, 488 p.
24. Tupikina E. N., Kocheva E. V., Matev N. A. *Razrabotka integral'nogo indikatora ekonomicheskoi bezopasnosti regiona (na primere Dal'nevostochnogo federal'nogo okruga)* [Development of an integral indicator of economic

security of the region (on the example of the Far Eastern federal district)]. Natsional'nye interesy: priority i bezopasnost' [National interests: priorities and security]. 2013, vol. 9, no. 46 (235), pp. 38-43.

ESTIMATION OF THE LEVEL OF ECONOMIC SECURITY USING THE INHOMOGENEOUS MARKOV PROCESS

K. K. Loginov,

Candidate of physical and mathematical sciences, Researcher, Omsk scientific center of the SB RAS (Omsk, Russia)

V. V. Karpov

Doctor of economic science, Director, Omsk scientific center of the SB RAS (Omsk, Russia)

Abstract. The article discusses an approach to assessing the stability of the regional economy, based on the heterogeneous Markov model. In the system of economic security of the region, stable states are distinguished, which can be ordered according to a certain level of stability, as well as a set of unstable states, characterized by a certain level of deviation from stable states (in this case, unstable states can also be ordered according to a certain level). The model specifies the transitions of the system between states under the influence of a set of external and internal threats to economic security in the form of an inhomogeneous Markov process. One of the main features of the model is the dependence of the intensity of transitions on the volume of budgetary funds required to monitor the level of economic security and aimed at eliminating potential threats or mitigating their actions. In addition, the model takes into account the fact that the allocation of funds for the deployment of some events does not bring an immediate effect, i.e. the intensity of transitions from an unstable state to a stable one is proportional to the period of time, counting from the moment of receipt of budgetary funds. In this work, on the basis of the Monte Carlo method, an algorithm is described for modeling the change of states of the considered random process over a finite time interval and calculating the final probabilities of states. The results obtained can be used by regional authorities as a tool for predicting the level of economic security, as well as in planning a set of measures aimed at maintaining the stability of the economic security system.

Keywords: economic security, integral index, final distribution, inhomogeneous Markov random process, Monte Carlo method.

This work was carried out within the governmental order for Omsk Scientific Center SB RAS (project registration number 121022000112-2).

Сведения об авторе

Логинов Константин Константинович – кандидат физико-математических наук, научный сотрудник сектора методов исследования проблем развития регионов Омского научного центра СО РАН (644024, Российская Федерация, г. Омск, пр. Карла Маркса, д. 15), e-mail: kloginov85@mail.ru (тел.: +7 (923) 682-39-35)

Карпов Валерий Васильевич – доктор экономических наук, профессор, директор Омского научного центра СО РАН (644024, Российская Федерация, г. Омск, пр. Карла Маркса, д. 15), e-mail: vvkarpov@oscsbras.ru (тел.: +7 (3812) 37-17-36)

Статья поступила в редакцию 10.01.2022 г.