

## Метод оценки эффективности организации эвакуации людей из общественного здания при пожаре с использованием агентно-ориентированного подхода

*Е.А. Коткова, А.В. Матвеев*

*Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России, Санкт-Петербург*

**Аннотация:** Статья посвящена исследованию поведения толпы в общественных зданиях при пожаре. Предлагается метод оценки эффективности организации эвакуации людей из общественного здания, позволяющий учитывать распространение паники среди эвакуирующихся. Метод основан на разработке имитационной модели эвакуации, учитывающей воздействия некоторых факторов на степень паники людей, реализующей агентно-ориентированный подход. Предлагаемый метод позволяет при описании психоэмоционального поведения каждого агента в отдельности в процессе эвакуации оценивать эффективность организации эвакуации толпы в целом. Результаты моделирования на примере здания торгово-развлекательного центра показывают, что возможные панические состояния эвакуирующихся могут оказывать влияние на эффективность эвакуации.

**Ключевые слова:** эвакуация, паника, имитационная модель, метод оценки эффективности, торгово-развлекательный комплекс, агентно-ориентированный подход.

### Введение

Проблема обеспечения безопасности людей в общественных зданиях в случае пожаров или чрезвычайных ситуаций (ЧС) в настоящее время весьма актуальна и она является неотъемлемой частью процесса урбанизации. С каждым годом в городах продолжается рост числа торгово-развлекательных центров, гипермаркетов, кинотеатров, учебных заведений, спортивных комплексов и др. Многие из новых спроектированных зданий имеют довольно сложную планировку [1]. Характерной особенностью для подобных зданий является то, что в случае пожара или ЧС значительное количество людей, находящихся в здании, может оказаться в ограниченном пространстве в условиях плохой осведомленности о планировке зданий, что приводит к неопределенности, растерянности и возможному возникновению паники, которая может привести к нерациональным действиям эвакуируемых.

Фактор паники оказывает существенное влияние на процесс эвакуации людей при ЧС, исследование и оценка его влияния на эффективность эвакуации является важной задачей. Проблемам исследования поведения толпы в ЧС посвящены, например, работы как отечественных [2 – 4], так и зарубежных ученых [5, 6], однако вопросы учета фактора паники в моделях эвакуации и установления закономерностей его влияния на время эвакуации до сих пор остаются открытыми.

Одним из первых исследований, доказывающих, что плотность людей во время ЧС оказывает большое влияние на скорость эвакуации, была работа [7]. Позднее, в статье [8] была предложена модель, в которой скорость движения эвакуирующихся людей изменялась в зависимости от степени паники. В 2012 году в работе [9] была предложена имитационная модель эвакуации, основанная влиянии некоторых факторов распространения паники. Данная модель подтвердила, что тяжесть чрезвычайной ситуации сильно связана с распространением паники в процессе эвакуации, а на эффективность принятых решений влияет эмоциональное состояние толпы. Кроме того, авторами данной статьи ранее была разработана системно-динамическая модель эвакуации [10], позволяющая учитывать множество причинно-следственных связей исследуемого процесса, исследования которой показали сильную взаимосвязь между степенью распространения опасности в общественном здании и количеством людей в паническом состоянии, взаимосвязь между скоростью движения толпы и эффективностью эвакуации. Полученные результаты подтверждают значительное влияние психоэмоционального состояния толпы на процесс эвакуации [11].

### **Методы исследования**

Для количественного оценивания влияния паники на общее время эвакуации людей из общественных зданий целесообразно рассмотреть две

---

модели эвакуации без учета фактора возникновения панического состояния в толпе и с учетом ее возникновения.

### *Модель процесса эвакуации людей без учета фактора паники*

В основе построения модели использован подход, впервые предложенный Д. Хелбингом [8], в котором поведение людей в процессе эвакуации из общественного здания подчиняется модели социальных сил, которая определяется следующим уравнением движения:

$$f_i = m_i \frac{d\vec{v}_1(t)}{dt} + \sum_{(i \neq j)} f_{ij} + \sum_w f_{iw} + \varepsilon_i(t) \quad (1)$$

где  $f_i$  – сумма социальных сил, действующих на эвакуирующегося  $i$ ,

$m_i \frac{d\vec{v}_1(t)}{dt}$  – движущая сила, когда эвакуирующиеся поддерживают

желаемую скорость,

$\sum_{(i \neq j)} f_{ij}$  и  $\sum_w f_{iw}$  – силы отталкивания, описывающие попытки сохранить определенное безопасное расстояние до других людей ( $j$ ) и препятствий ( $w$ ).

$\varepsilon_i(t)$  – сила индивидуальных колебаний.

При данном подходе в модели не учитывается фактор возможной паники, скорость движения определяется исключительно в зависимости от плотности потока людей. В принятых и используемых МЧС России моделях эвакуации используется аналогичный подход, когда скорость перемещения эвакуируемых определяется лишь плотностью потока, видом эвакуационного пути и группой мобильности эвакуирующихся (см. Приказ МЧС России от 30.06.2009 № 382 "Об утверждении методики определения расчетных величин пожарного риска в зданиях, сооружениях и строениях различных классов функциональной пожарной опасности").

### **Модель процесса эвакуации людей с учетом фактора паники**

На процесс возникновения и распространения паники у людей в процессе эвакуации в случае пожара или ЧС может оказывать влияние внешняя среда, а также поведение других эвакуирующихся. В работе [8] показано, что уровень психоэмоционального состояния или степени паники эвакуируемых может зависеть от трех основных факторов:

- время нахождения в здании  $t$ ;
- плотность скопления людей  $D$ ;
- расстояние до выхода  $l$ .

Воздействия данных факторов предлагается описать соответствующими монотонно возрастающими функциями  $f_1(t)$ ,  $f_2(D)$ ,  $f_3(l)$ , так как очевидно, что чувство страха, а значит и панического состояния у эвакуируемого не уменьшается при развитии критической ситуации.

В данной модели предлагается сделать еще одно допущение, состоящее в том, что существует некое критическое время  $t_c$  с соответствующим значением функции  $f_1(t_c)$ , для которой в случае  $t < t_c$  время пребывания людей в критической ситуации еще незначительно и недостаточно, чтобы они начали входить в паническое состояние и проявлять соответствующую реакцию. Если же  $t > t_c$ , то уже возможно проявление у эвакуирующихся панического состояния. Время, когда начинает проявляться паническая реакция у эвакуируемых, может быть определено на основе порогового уровня паники  $P_L$ :

$$\left\{ \begin{array}{l} P_L = \min(f_1(t_c), f_2(D_c), f_3(l_c)) \\ f_1(t) = (1 + e^{-\left(\frac{10.6t}{t_{max}} - 5.3\right)})^{-1}, \quad 0 \leq f_1(t) \leq 1 \\ f_2(D) = (1 + e^{-\left(\frac{10.6D}{D_{max}} - 5.3\right)})^{-1}, \quad 0 \leq f_2(D) \leq 1 \\ f_3(l) = (1 + e^{-\left(\frac{10.6l}{l_{max}} - 5.3\right)})^{-1}, \quad 0 \leq f_3(l) \leq 1 \end{array} \right. \quad (2)$$

где  $t_c$  – критическое время, значение которого равно 60 секундам, до которого не начинается процесс эвакуации и, следовательно, проявление возможной панической реакции у эвакуируемых,

$D_c$  – критическое значение плотности, которое устанавливается на уровне 3,33 (ч/м<sup>2</sup>) [7],

$l_c$  – критическое расстояние до выхода, т.е. расстояние от выхода до точки, от которой эвакуирующийся уже точно не заблудится и сможет гарантированно переместиться наружу,

$t_{max}$  – максимально допустимое значение времени пребывания людей в здании, которое представляет собой прогнозируемое время до начала воздействия опасных факторов пожара,

$D_{max}$  – максимально допустимое значение плотности, которое установлено на уровне 5,0 (ч/м<sup>2</sup>) [7].

$l_{max}$  – максимально возможное значение расстояния до выхода, которое представляет собой расстояние от самой дальней точки в здании до выхода.

Для каждого эвакуируемого значение степени паники  $P$  может быть определено на основе выражения:

$$P = a_1 \cdot f_1(t) + a_2 \cdot f_2(D) + a_3 \cdot f_3(l), \quad (3)$$

где  $a_1, a_2, a_3$  – весовые коэффициенты,  $a_1 + a_2 + a_3 = 1$ .

Степень влияния фактора времени нахождения в зоне опасности при пожаре или ЧС в здании ( $I_t$ ), фактора плотности скопления людей ( $I_D$ ) и фактора расстояния до выхода ( $I_l$ ) определяется следующим образом:

$$I_t = \left( \frac{|t - t_{max}|}{t_{max}} \right), \quad I_D = \left( \frac{|D - D_{max}|}{D_{max}} \right), \quad I_l = \left( \frac{|l - l_{max}|}{l_{max}} \right). \quad (4)$$

Весовые коэффициенты  $a_i$  в уравнении (3) будут определяться на основе выражений:

$$a_1 = \frac{I_t}{(I_t + I_D + I_l)}, \quad a_2 = \frac{I_D}{(I_t + I_D + I_l)}, \quad a_3 = \frac{I_l}{(I_t + I_D + I_l)}. \quad (5)$$

Степень паники  $P_i$  каждого  $i$ -го агента при имитационном моделировании вычисляется один раз в секунду. Агенты начинают проявлять паническую реакцию, когда значение  $P_i$  оказывается выше, чем  $P_L$ , а их скорость в этом случае будет определяться следующим образом:

$$V_i = (1 - P_i) \cdot V_0 + P_i \cdot V_{max}, \quad (6)$$

где  $V_0$  – начальная скорость в условиях отсутствия паники для соответствующего участка эвакуационного пути,

$V_{max}$  – максимальная скорость в условиях отсутствия паники для соответствующего участка эвакуационного пути.

### Результаты исследования и их обсуждение

В настоящее время возможность оценки реального уровня безопасности в случаях пожаров и чрезвычайных ситуаций в общественных зданиях проблематично, так как проведение учений или тренировок по эвакуации людей из здания является финансово затратным и может привести к серьезным травмам участников. Поэтому для преодоления вышеупомянутых проблем в качестве альтернативы используются методы имитационного моделирования, которые в настоящее время являются одним самых популярных и приоритетных при оценке рисков в сложных системах или процессах [12, 13].

Для реализации представленных выше моделей эвакуации использована система имитационно моделирования AnyLogic, которая представляет собой набор инструментов для динамического моделирования, включая библиотеку для моделирования пешеходных потоков. Используя перспективы агентного подхода к моделированию, оказывается возможным в AnyLogic имитировать возможные панические состояния эвакуирующихся в соответствии с моделью, представленной выше. Конкретные правила

---

поведения отдельных агентов согласуются с пешеходной библиотекой AnyLogic, основанной на модели социальной силы Хелбинга [8]. Агенты выбирают кратчайший путь эвакуации, а также принимают решения в соответствии с восприятием информации, например, изменяют скорость, направление движения в зависимости от сложившейся ситуации в соответствии с моделью их поведения в зависимости от степени паники.

Предложенные выше модели эвакуации легли в основу метода оценки эффективности организации эвакуации людей в общественном здании при пожаре, структурная схема которого представлена на рис. 1.

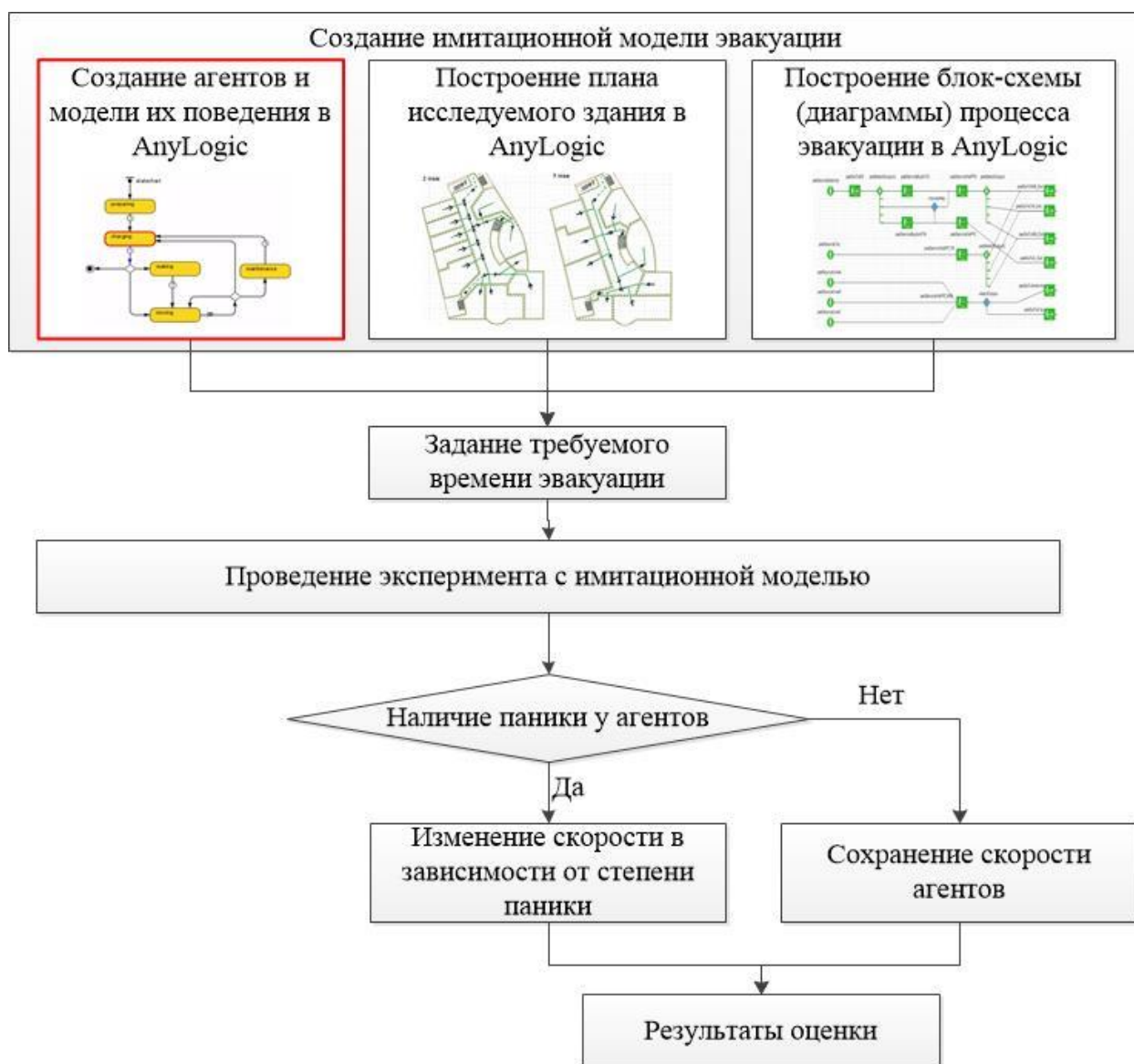


Рис. 1. – Схема метода оценки эффективности организации эвакуации

Применение предлагаемого подхода было рассмотрено на примере эвакуации людей из здания торгово-развлекательного центра, модель которой подробно изложена в работе [14]. Рассматривались 7 базовых сценариев (таблица №1) в зависимости от состояния каждого из 3-х выходов в здании. В каждом из сценариев общее количество эвакуирующихся оставалось одинаковым (750 чел.).

Таблица № 1

Сценарии развития событий в процессе эвакуации

Сценарий	Описание сценария
Сценарий 1	Все выходы открыты (не заблокированы)
Сценарий 2	Главный выход (1) закрыт (заблокирован)
Сценарий 3	Эвакуационный (аварийный) выход (2) закрыт (заблокирован)
Сценарий 4	Эвакуационный (аварийный) выход (3) закрыт (заблокирован)
Сценарий 5	Открыт только основной выход (1)
Сценарий 6	Открыт только эвакуационный (аварийный) выход (2)
Сценарий 7	Открыт только эвакуационный (аварийный) выход (3)

Время эвакуации является основным критерием оценки эффективности организации эвакуации из зданий с массовым пребыванием людей, поэтому по каждому сценарию проводилась оценка времени эвакуации в двух случаях: при использовании имитационной модели без учета фактора паники и при его учете (таблица №2).

Проведенные исследования показывают существенное влияние возможного панического состояния эвакуирующихся на общее время эвакуации при определенных сценариях. Паническое состояние, возникающее у эвакуирующихся, приводит к изменению скорости их перемещения, что при реализации некоторых сценариев может привести к увеличению времени эвакуации и катастрофическим последствиям. В



особенности в тех случаях, когда данные реакции будут приводить к увеличению плотности людей на определенных участках эвакуационных путей, созданию скопления людей и давки.

Таблица № 2

Результаты моделирования времени эвакуации

№ сценария	Время эвакуации без учета фактора паники, сек	Время эвакуации при учете фактора паники, сек	Изменение времени эвакуации, сек	Влияние фактора паники, %
1	442	413	-29	6.56%
2	687	765	78	-11.35%
3	474	448	-26	5,49%
4	563	583	20	-3.55%
5	597	634	37	-6.20%
6	875	965	90	-10.29%
7	706	814	108	-15.3%

Люди, подвергшиеся панике, начинают двигаться хаотично и непредсказуемо, такого рода воздействие приводит к задержке других людей и распространению паники в толпе. Таким образом, влияние данного фактора будет приводить к снижению эффективности эвакуации.

### Заключение

В статье предложен метод оценки эффективности организации эвакуации людей из общественного здания при пожаре, позволяющий учитывать фактор распространения паники среди эвакуирующихся. Распространение панического состояния реализуется с использованием агентно-ориентированного подхода в среде AnyLogic.

Предлагаемый метод позволяет при описании психоэмоционального поведения каждого агента в отдельности в процессе эвакуации оценивать эффективность организации эвакуации толпы в целом.

Результаты моделирования на примере здания торгово-развлекательного центра показывают, что возможные панические состояния эвакуирующихся могут оказывать влияние на эффективность эвакуации.

### Литература

1. Рудченко Г.И., Власова О.С., Рогова Ю.А. К вопросу о нормативно-правовом регулировании в области обеспечения пожарной безопасности торгово-развлекательных комплексов и центров // Инженерный вестник Дона. 2023. № 3. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2023/8296/](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2023/8296/).

2. Касьяник П.М. Современные зарубежные исследования поведения толпы в экстремальных ситуациях // Прикладная юридическая психология. 2014. № 3. С. 157–164.

3. Голубева С.Н., Матюшин А.В., Порошин А.А. Психологические факторы возникновения паники при пожарах: состояние и степень исследования проблемы // Пожарная безопасность. 2006. № 3. С. 82–87.

4. Калачин С.В. Прогнозирование распространения паники среди людей при эвакуации из здания во время пожара // Безопасность труда в промышленности. 2020. № 10. С. 77–82. DOI: 10.24000/0409-2961-2020-10-77-82

5. Коо J., Kim B. I., Kim Y. S. Estimating the effects of mental disorientation and physical fatigue in a semi-panic evacuation // Expert Systems with Applications. 2014. Vol. 41. № 5. pp. 2379-2390.

6. Miyoshi T., Nakayasu H., Ueno Y., Pattersin P. An emergency aircraft evacuation simulation considering passenger emotions // Computers & Industrial Engineering. 2012. Vol. 62. No. 3. pp. 746-754.

7. Fruin J. Pedestrian planning and design, metropolitan association of urban design and environmental planners // Inc., New York. 1971. Vol. 20. No. 6. URL: [trid.trb.org/view/114653](http://trid.trb.org/view/114653)

8. Helbing D., Buzna L., Johansson A., Werner T. Self-organized pedestrian crowd dynamics: Experiments, simulations, and design solutions // *Transportation science*. 2005. Vol. 39. No. 1. pp. 1-24.

9. Wang J., Lo S., Sun J., Wang Q., Mu H. Qualitative simulation of the panic spread in large-scale evacuation // *Simulation*. 2012. Vol. 88. No. 12. pp. 1465-1474.

10. Коткова Е.А. Системно-динамическая модель распространения паники при эвакуации из общественных зданий // *Научно-аналитический журнал "Вестник Санкт-Петербургского университета Государственной противопожарной службы МЧС России"*. 2022. № 1. С. 182-194. EDN TITMES.

11. Коткова Е.А. Модель нейронной сети для прогнозирования предэвакуационного поведения людей при пожаре // *Национальная безопасность и стратегическое планирование*. 2022. № 2(38). С. 66-72. DOI: 10.37468/2307-1400-2022-2-66-72. EDN UB1KMZ.

12. Шеина С.Г., Новоселова И.В., Дементеев Д.С. Применение технологий информационного моделирования при возникновении чрезвычайных ситуаций // *Инженерный вестник Дона*. 2023. № 1. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2023/8128/](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2023/8128/).

13. Бутырский Е.Ю., Матвеев А.В. Математическое моделирование систем и процессов. Санкт-Петербург: Информационный издательский учебно-научный центр "Стратегия будущего", 2022. 733 с. DOI: 10.37468/book\_011222. EDN CCRIRT.

14. Коткова Е.А. Модель оценки эффективности управления безопасностью людей в общественном здании при пожаре с использованием методов имитационного моделирования // *Вестник Воронежского института ФСИН России*. 2021. № 4. С. 69-76. EDN VCBVBBQ.

---

## References

1. Rudchenko G.I., Vlasova O.S., Rogova YU.A. Inzhenernyj vestnik Dona. 2023. № 3. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2023/8296/](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2023/8296/).
  2. Kas'yanik P.M. Prikladnaya yuridicheskaya psihologiya. 2014. № 3. pp. 157–164.
  3. Golubeva S.N., Matyushin A.V., Poroshin A.A. Pozharnaya bezopasnost'. 2006. № 3. pp. 82–87.
  4. Kalachin S.V. Bezopasnost' truda v promyshlennosti. 2020. № 10. P. 77–82. DOI: 10.24000/0409-2961-2020-10-77-82
  5. Koo J., Kim B. I., Kim Y. S. Expert Systems with Applications. 2014. Vol. 41. No 5. pp. 2379-2390.
  6. Miyoshi T., Nakayasu H., Ueno Y., Pattersin P. Computers & Industrial Engineering. 2012. Vol. 62. No. 3. pp. 746-754.
  7. Fruin J. Pedestrian planning and design, metropolitan association of urban design and environmental planners // Inc., New York. 1971. Vol. 20. No. 6. URL: [trid.trb.org/view/114653](http://trid.trb.org/view/114653)
  8. Helbing D., Buzna L., Johansson A., Werner T. Transportation science. 2005. Vol. 39. No. 1. pp. 1-24.
  9. Wang J., Lo S., Sun J., Wang Q., Mu H. Simulation. 2012. Vol. 88. No. 12. pp. 1465-1474.
  10. Kotkova E.A. Nauchno-analiticheskij zhurnal "Vestnik Sankt-Peterburgskogo universiteta Gosudarstvennoj protivopozharnoj sluzhby MCHS Rossii". 2022. № 1. pp. 182-194. EDN TITMEC.
  11. Kotkova E.A. Nacional'naya bezopasnost' i strategicheskoe planirovanie. 2022. № 2(38). pp 66-72. DOI: 10.37468/2307-1400-2022-2-66-72. EDN UBIKMZ.
  12. SHEina S.G., Novoselova I.V., Dementeev D.S. Inzhenernyj vestnik Dona. 2023. № 1. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2023/8128/](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2023/8128/).
-



13. Butyrskij E.YU., Matveev A.V. Matematicheskoe modelirovanie sistem i processov [Mathematical modeling of systems and processes]. Sankt-Peterburg: Informacionnyj izdatel'skij uchebno-nauchnyj centr "Strategiya budushchego", 2022. 733 p. DOI: 10.37468/book\_011222. EDN CCRIRT.

14. Kotkova E.A. Vestnik Voronezhskogo instituta FSIN Rossii. 2021. № 4. pp. 69-76. EDN VCBBBQ.