

Научная статья
УДК 519.816, 614.8, 51–7
doi:10.34987/vestnik.sibpsa.2025.84.43.004

Способ оценки устойчивости объекта транспортной инфраструктуры к чрезвычайным ситуациям природного и техногенного характера

Александр Андреевич Воронин¹

Джасур Тагой Хазратзода²

Юрий Витальевич Прус³

¹Российский государственный социальный университет, Москва, Россия

²Академия ГПС МЧС России, Москва, Россия

³ВНИИ ГОЧС МЧС России, Москва, Россия

Автор ответственный за переписку: Александр Андреевич Воронин, stalkercrow@yandex.ru

Аннотация. В данной статье представлен метод оценки устойчивости объектов транспортной инфраструктуры, с акцентом на автодорожные тоннели, в условиях чрезвычайных ситуаций, как природного, так и техногенного характера. Основной идеей исследования является создание иерархической структуры показателей, которые позволят более эффективно оценивать состояние различных элементов системы и их взаимодействие.

Статья начинается с обоснования актуальности оценки устойчивости транспортных объектов, после чего выделяются ключевые аспекты, влияющие на устойчивость тоннелей. К авторскому методу относится использование нормированных показателей для оценки состояния структурных элементов тоннеля. Это позволяет выявить наиболее уязвимые места и провести анализ, основываясь на количественных данных.

Ключевой момент исследования заключается в конволюции коэффициентов значимости и соответствующих показателей, что помогает создать более детализированную картину устойчивости объекта. Эта методология позволяет не только осуществлять текущий мониторинг состояния транспортных объектов, но и формировать прогнозы их работы в условиях потенциальных угроз.

Статья подчеркивает, что комплексный подход к оценке устойчивости тоннелей может служить основой для принятия управленческих решений и оптимизации мероприятий по предотвращению аварийных ситуаций, что имеет значительное значение для обеспечения безопасности транспортного сообщения и минимизации ущерба от возможных чрезвычайных ситуаций.

Основная мысль статьи заключается в разработке и описании эффективного метода, позволяющего оценить устойчивость различных объектов транспортной инфраструктуры в условиях экстремальных воздействий, что способствует повышению безопасности и надежности транспортной инфраструктуры в целом.

Ключевые слова: транспортная инфраструктура, иерархия, устойчивость, оценка, управленческие решения, чрезвычайная ситуация

Для цитирования: Воронин А.А., Хазратзода Д.Т., Прус Ю.В. Способ оценки устойчивости объекта транспортной инфраструктуры к чрезвычайным ситуациям природного и техногенного характера // Сибирский пожарно-спасательный вестник. 2025. № 1 (36). С. 39-45. <https://doi.org/10.34987/vestnik.sibpsa.2025.84.43.004>

Original article

A method for assessing the resilience of a transport infrastructure facility to natural and man-made emergencies

Alexander A. Voronin¹

Jasur T. Hazratzoda²

Yuri V. Prus³

¹Russian State Social University, Moscow, Russia

²Academy of the State Fire Service of the Ministry of Emergency Situations of Russia, Moscow, Russia

³All-Russian Research Institute for Civil Defense and Emergencies of the Ministry of Emergency Situations, Moscow, Russia

Corresponding author: Alexander A. Voronin, stalkercrow@yandex.ru

Abstracts. This article presents a method for assessing the sustainability of transport infrastructure facilities, with an emphasis on road tunnels, in emergency situations, both natural and man-made. The main idea of the research is to create a hierarchical structure of indicators that will make it possible to more effectively assess the state of various elements of the system and their interaction.

The article begins by substantiating the relevance of assessing the stability of transport facilities, after which the key aspects affecting the stability of tunnels are highlighted. The author's method includes the use of standardized indicators to assess the condition of the tunnel's structural elements. This allows you to identify the most vulnerable areas and conduct an analysis based on quantitative data.

The key point of the study is the convolution of the significance coefficients and the corresponding indicators, which helps to create a more detailed picture of the stability of the object. This methodology allows not only to carry out current monitoring of the condition of transport facilities, but also to form forecasts of their operation in conditions of potential threats.

The article emphasizes that an integrated approach to assessing tunnel stability can serve as a basis for making managerial decisions and optimizing emergency prevention measures, which is essential for ensuring the safety of transport links and minimizing damage from possible emergencies.

The main idea of the article is to develop and describe an effective method that makes it possible to assess the stability of various transport infrastructure facilities under extreme conditions, which contributes to improving the safety and reliability of the transport infrastructure as a whole.

Keywords: transport infrastructure, hierarchy, sustainability, assessment, management decisions, emergency

For citation: Voronin A.A., Hazratzoda D.T., Prus Yu.V. A method for assessing the resilience of a transport infrastructure facility to natural and man-made emergencies // Siberian Fire and Rescue Bulletin. 2025. № 1 (36). С. 39-45. (In Russ.) <https://doi.org/10.34987/vestnik.sibpsa.2025.84.43.004>

Введение

Транспортная инфраструктура (ТИ) играет важную роль в обеспечении экономического и социального развития страны. Однако она подвержена различным рискам, таким как природные бедствия, технические сбои, террористические акты и другие чрезвычайные ситуации. Для обеспечения безопасности и надежности транспортной инфраструктуры необходимо провести оценку ее устойчивости в условиях чрезвычайных ситуаций (ЧС).

Под устойчивостью функционирования объекта транспортной инфраструктуры понимается его способность выполнять свои функции и сохранять основные параметры в пределах установленных норм при всех видах внутренних и внешних воздействий в ЧС различного характера [1-4].

Для оценки устойчивости объекта транспортной инфраструктуры при ЧС необходимо разработать подход, основанный на построении иерархии показателей, характеризующих состояние различных элементов структуры и функционирование систем объекта. Этот подход позволит оценить уровень уязвимости объекта и определить наиболее критические точки, которые могут потенциально привести к разрушению инфраструктуры.

Основные элементы, обеспечивающие устойчивость объекта транспортной инфраструктуры

При оценке устойчивости объекта необходимо определить совокупность элементов, влияющих на его безопасное функционирование и жизнеспособность при ЧС.

Согласно межгосударственному стандарту: ГОСТ 33153-2014 «Дороги автомобильные общего пользования. Проектирование тоннелей. Общие требования» при проектировании и эксплуатации объекта транспортной инфраструктуры должны быть выполнены определенные требования в части объемно-планировочных и конструктивных решений, а также наличия систем, обеспечивающих безопасность при эксплуатации объекта и наступлении ЧС. К таким системам можно отнести:

- Система пожарной безопасности;
- Система электроснабжения;
- Система охранной сигнализации;
- Система ограничения въезда;
- Система освещения;
- Система вентиляции;
- Система водоснабжения/водоотведения;
- Система, обеспечивающая организацию и безопасность дорожного движения;
- Система связи;
- Система инженерных сооружений и конструкций.

От функционирования данных систем зависит общая устойчивость объекта транспортной инфраструктуры. При этом каждая система влияет на устойчивость по-разному и направлена на различные процессы. Для определения влияния отдельных систем и элементов на устойчивость объекта ТИ необходимо выявить выполняемые им функции, входящие в функциональные блоки, соответствующие той или иной функции объекта транспортной инфраструктуры в целом. Это позволяет оценить устойчивость отдельных элементов и систем, функционирования объекта ТИ при воздействии поражающих факторов отдельных видов ЧС, и общей устойчивости объекта ТИ. На рисунке ниже представлена иерархия устойчивости объекта ТИ с приоритетами (коэффициентами значимости) отдельных элементов.

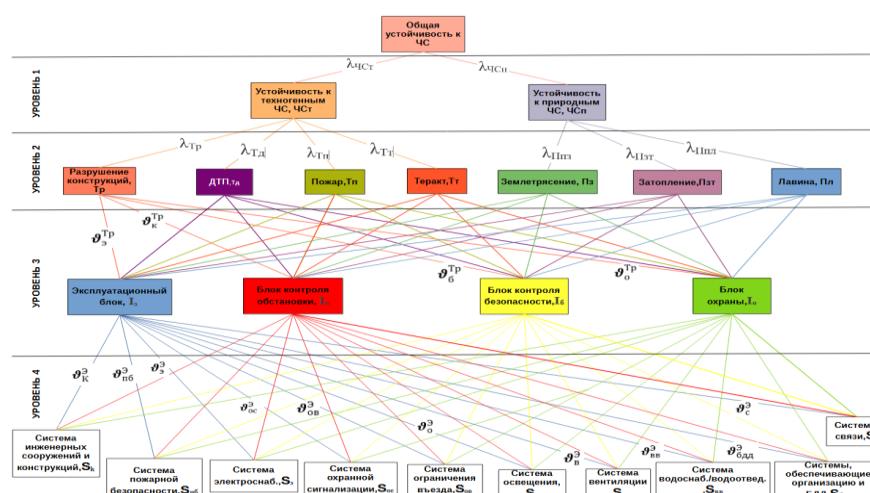


Рис. 1. Иерархия устойчивости объекта ТИ

Описание уровней иерархии устойчивости объекта ТИ

Первый уровень представляет собой общую устойчивость объекта транспортной инфраструктуры к чрезвычайным ситуациям природного или техногенного характера.

ЧС техногенного характера на объекте транспортной инфраструктуры могут включать:

- Транспортные аварии и катастрофы;
- Пожары и взрывы;
- ЧС с выбросами химических веществ;
- ЧС с выбросами радиоактивных веществ;
- ЧС с выбросами биологически опасных веществ;
- ЧС, вызванные обрушениями вызванные недостатками конструкции.

ЧС природного характера на объекте транспортной инфраструктуры могут включать:

- Геологические явления (землетрясения, извержения вулканов, оползни, сели, снежные лавины);
- Метеорологические явления (ураганы, бури, снежные бури, смерчи);
- Гидрологические явления (наводнения, заторы, зажоры, нагоны, цунами);
- Природные пожары (лесные, торфяные, степные).

Второй уровень характеризует виды возможных чрезвычайных ситуаций в зависимости от характера ЧС.

Третий уровень представляют собой интеграцию основных систем объекта транспортной инфраструктуры по функциям в блоки. Каждый блок несет в себе определенное количество функций.

Четвертый уровень представляет собой набор основных систем необходимых для полноценного функционирования объекта. В зависимости от вида объекта транспортной инфраструктуры набор основных систем может быть различен. Это связано, прежде всего, с тем, что при проектировании и/или строительстве используют принципиально новые конструктивные решения и/или технологии.

В дальнейшем проводится оценка устойчивости элементов структуры с использованием нормированных показателей, а также осуществляется конволюция коэффициентов значимости и соответствующих показателей [5]. Это позволяет определить индексы устойчивости отдельных систем и общий индекс устойчивости [6].

Индексы устойчивости отдельных систем и возможных ЧС

Индексы устойчивости отдельных систем представляют собой комплексные показатели устойчивости функционирования основных систем объекта транспортной инфраструктуры, объединенных по функциям в блоки. В данном случае вычисление индексов устойчивости производится для каждого блока отдельно на основе аддитивной конволюции по четырем блокам:

$$\begin{aligned}
 I_{\Sigma} &= \vartheta_K^{\Sigma} \cdot I_K^{\Sigma} + \vartheta_{пб}^{\Sigma} \cdot I_{пб}^{\Sigma} + \vartheta_{\Sigma}^{\Sigma} \cdot I_{\Sigma}^{\Sigma} + \vartheta_{ос}^{\Sigma} \cdot I_{ос}^{\Sigma} + \vartheta_{ов}^{\Sigma} \cdot I_{ов}^{\Sigma} + \\
 &+ \vartheta_0^{\Sigma} \cdot I_0^{\Sigma} + \vartheta_B^{\Sigma} \cdot I_B^{\Sigma} + \vartheta_{вв}^{\Sigma} \cdot I_{вв}^{\Sigma} + \vartheta_{бдд}^{\Sigma} \cdot I_{бдд}^{\Sigma} + \vartheta_c^{\Sigma} \cdot I_c^{\Sigma} \\
 I_K &= \vartheta_K^K \cdot I_K^K + \vartheta_{пб}^K \cdot I_{пб}^K + \vartheta_{\Sigma}^K \cdot I_{\Sigma}^K + \vartheta_{ос}^K \cdot I_{ос}^K + \vartheta_{ов}^K \cdot I_{ов}^K + \\
 &+ \vartheta_0^K \cdot I_0^K + \vartheta_B^K \cdot I_B^K + \vartheta_{вв}^K \cdot I_{вв}^K + \vartheta_{бдд}^K \cdot I_{бдд}^K + \vartheta_c^K \cdot I_c^K \\
 I_{\Sigma} &= \vartheta_K^{\Sigma} \cdot I_K^{\Sigma} + \vartheta_{пб}^{\Sigma} \cdot I_{пб}^{\Sigma} + \vartheta_{\Sigma}^{\Sigma} \cdot I_{\Sigma}^{\Sigma} + \vartheta_{ос}^{\Sigma} \cdot I_{ос}^{\Sigma} + \vartheta_{ов}^{\Sigma} \cdot I_{ов}^{\Sigma} + \\
 &+ \vartheta_0^{\Sigma} \cdot I_0^{\Sigma} + \vartheta_B^{\Sigma} \cdot I_B^{\Sigma} + \vartheta_{вв}^{\Sigma} \cdot I_{вв}^{\Sigma} + \vartheta_{бдд}^{\Sigma} \cdot I_{бдд}^{\Sigma} + \vartheta_c^{\Sigma} \cdot I_c^{\Sigma} \\
 I_0 &= \vartheta_K^0 \cdot I_K^0 + \vartheta_{пб}^0 \cdot I_{пб}^0 + \vartheta_{\Sigma}^0 \cdot I_{\Sigma}^0 + \vartheta_{ос}^0 \cdot I_{ос}^0 + \vartheta_{ов}^0 \cdot I_{ов}^0 + \\
 &+ \vartheta_0^0 \cdot I_0^0 + \vartheta_B^0 \cdot I_B^0 + \vartheta_{вв}^0 \cdot I_{вв}^0 + \vartheta_{бдд}^0 \cdot I_{бдд}^0 + \vartheta_c^0 \cdot I_c^0
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

где:

$I_{(**)}^{(*)}$ – индексы устойчивости в различных блоках уровня 3 (*) для каждой из 10 систем уровня 4(**).

Индексы устойчивости для каждой из 10 систем представляют собой нормированные показатели, которые вычисляются либо определяются экспертным путем [3,5], в соответствии с методиками, разработанными для конкретного объекта.

Для второго уровня вычисление индексов устойчивости производится для каждого вида ЧС отдельно на основе аддитивной конволюции по семи блокам:

$$\begin{aligned} T_p &= \vartheta_3^{Tp} \cdot I_3^{Tp} + \vartheta_k^{Tp} \cdot I_k^{Tp} + \vartheta_6^{Tp} \cdot I_6^{Tp} + \vartheta_0^{Tp} \cdot I_0^{Tp} \\ T_d &= \vartheta_3^{Td} \cdot I_3^{Td} + \vartheta_k^{Td} \cdot I_k^{Td} + \vartheta_6^{Td} \cdot I_6^{Td} + \vartheta_0^{Td} \cdot I_0^{Td} \\ T_n &= \vartheta_3^{Tp} \cdot I_3^{Tp} + \vartheta_k^{Tp} \cdot I_k^{Tp} + \vartheta_6^{Tp} \cdot I_6^{Tp} + \vartheta_0^{Tp} \cdot I_0^{Tp} \\ T_t &= \vartheta_3^{Tt} \cdot I_3^{Tt} + \vartheta_k^{Tt} \cdot I_k^{Tt} + \vartheta_6^{Tt} \cdot I_6^{Tt} + \vartheta_0^{Tt} \cdot I_0^{Tt} \\ P_3 &= \vartheta_3^{P3} \cdot I_3^{P3} + \vartheta_k^{P3} \cdot I_k^{P3} + \vartheta_6^{P3} \cdot I_6^{P3} + \vartheta_0^{P3} \cdot I_0^{P3} \\ P_{3т} &= \vartheta_3^{P3т} \cdot I_3^{P3т} + \vartheta_k^{P3т} \cdot I_k^{P3т} + \vartheta_6^{P3т} \cdot I_6^{P3т} + \vartheta_0^{P3т} \cdot I_0^{P3т} \\ P_l &= \vartheta_3^{Pl} \cdot I_3^{Pl} + \vartheta_k^{Pl} \cdot I_k^{Pl} + \vartheta_6^{Pl} \cdot I_6^{Pl} + \vartheta_0^{Pl} \cdot I_0^{Pl} \end{aligned} \quad (2)$$

Общий индекс устойчивости

Общий индекс устойчивости для первого уровня представляет собой показатель устойчивости функционирования системы при ЧС техногенного и природного характера. Вычисляется путем свертки показателей оценки устойчивости каждого вида ЧС и весовых коэффициентов значимости для отдельных блоков:

Для ЧС техногенного характера:

$$J_T = \lambda_{Tp} \cdot T_p + \lambda_{Td} \cdot T_d + \lambda_{Tn} \cdot T_n + \lambda_{Tt} \cdot T_t \quad (3)$$

Для ЧС природного характера:

$$J_P = \lambda_{P3} \cdot P_3 + \lambda_{P3т} \cdot P_{3т} + \lambda_{Pl} \cdot P_l \quad (4)$$

Общий индекс устойчивости объекта ТИ рассчитывается на основе аддитивной свертки комплексных показателей устойчивости для разных видов ЧС и весовых коэффициентов значимости:

$$J = \lambda_{ЧСТ} \cdot J_T + \lambda_{ЧСП} \cdot J_P \quad (5)$$

Градация классов устойчивости

Оценку устойчивости можно проводить по разным уровням, что позволяет определить устойчивость объекта в целом, а также устойчивость каждой системы.

Выбор класса устойчивости зависит от конкретных требований к объекту и/или системе, его/её целей и возможных последствий сбоев. Важно стремиться к созданию и поддержанию системы с высокой устойчивостью для обеспечения надежной работы и минимизации рисков ошибок.

Пример:

1. Класс А - система с высокой устойчивостью: индекс устойчивости близок к 1.0, что указывает на способность системы к быстрой и эффективной коррекции ошибок или сбоев.
2. Класс В - система с умеренной устойчивостью: индекс устойчивости находится в диапазоне от 0.7 до 0.9, что свидетельствует о способности системы к быстрой коррекции ошибок, но с некоторыми задержками или необходимостью дополнительных мер защиты.
3. Класс С - система с низкой устойчивостью: индекс устойчивости ниже 0.7, что указывает на ограниченную способность системы к коррекции ошибок или сбоев, требуя постоянного внимания и вмешательства оператора.

Заключение

Таким образом, в данной работе предлагается новый способ оценки показателей устойчивости объекта транспортной инфраструктуры в чрезвычайных ситуациях. Этот способ основан на выявлении различных показателей, которые отражают различные аспекты функционирования систем объекта. Данный подход позволяет проводить обоснованные оценки, как общей устойчивости системы, так и устойчивости отдельных компонентов. Предложенный способ может быть использован как инструмент для принятия управленческих решений [7] в области проектирования и эксплуатации транспортной инфраструктуры в условиях угроз природного и техногенного характера, а в совокупности с созданием математического инструментария для поддержки принятия управленческих решений при автомобильных авариях может значительно сократить риски последствий аварии [8]. Данный способ позволяет проводить оценку устойчивости практически любого объекта транспортной инфраструктуры и на любом уровне иерархии при этом каждый уровень возможно развернуть на неограниченное количество подуровней в зависимости от требований к оценке и сложности самой системы.

Список источников

1. Арефьева Е.В. Методика оценки эффективности мероприятий по реализации государственной программы «Защита населения и территорий от чрезвычайных ситуаций, обеспечение пожарной безопасности и безопасности людей на водных объектах» // Технологии гражданской безопасности. 2016. – № 4 (50). – С. 38–44.
2. Олтян И.Ю., Арефьева Е.В., Котосонов А.С., Верескун А.С., Рыдель А.С. Методика для системной оценки эффективности реализации задач и приоритетных направлений государственной политики в области защиты населения и территорий от чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера // Технологии гражданской безопасности. 2020. – № 4 (68). – С. 30–37.
3. Котосонов А.С., Арефьева Е.В., Прус Ю.В. Интегральные показатели риска чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера в территориально распределенных природно - технических системах // Технологии гражданской безопасности. 2024. – № 1 (79). – С. 27–33.
4. Доклад о мировых рисках за 2022 год, подготовленный Рурским университетом в Бохуме - Институтом международного права мира и вооруженных конфликтов (IFHV) // World Economic Forum: сайт. – URL: <https://www.weforum.org/publications/global-risks-report-2022/> (дата обращения 12.02.2025).
5. Арефьева Е.В., Прус Ю.В., Котосонов А.С. Подход к оценке показателей устойчивости систем жизнеобеспечения населения // Технологии гражданской безопасности. 2024. – № 4 (82). – С. 63–69.
6. Арефьева Е.В., Муравьева Е.В., Котосонов А.С., Полторанов Д.В., Кузьмин А.В. Анализ подходов и методов формирования интегральных индексов риска при работе с паспортами безопасности территорий субъектов // Технологии гражданской безопасности. 2023. – № 3 (77). – С. 50–58.
7. Олтян И.Ю. Дистанционная оценка интегрального показателя риска чрезвычайных ситуаций / Олтян И.Ю., Арефьева Е.В., Котосонов А.С. // Сборник материалов конференций: Материаловедение и инженерия: Международная конференция по строительству, архитектуре

и техносферной безопасности. Сочи: Изд-во: IOP Publishing. 2020. Том 962. С. 042053. DOI 10.1088/1757-899X/962/4/042053. EDN XJGGYQ.

8. Воронин А.А., Прус Ю.В. Математическое распознавание аварийных ситуаций с помощью систем датчиков и взаимодействие со службами экстренного реагирования // Материалы XXXI международной конференции «Проблемы управления безопасностью сложных систем»: сборник статей / под ред. Калашников А.А., Кульба В.В. Москва: Изд-во ИПУ РАН. 2023. Гл. 6. С. 400-406.

References

1. Arefyeva E.V. Methodology for evaluating the effectiveness of measures to implement the state program "Protection of the population and territories from emergency situations, ensuring fire safety and human safety on water bodies" // Technologies of civil safety. – 2016. – №. 4(50). – pp. 38-44.

2. Oltyan I.Y., Arefyeva E.V., Kotosonov A.S., Vereskun A.S., Rydel A.S. Methodology for a systematic assessment of the effectiveness of the implementation of tasks and priorities of state policy in the field of protection of the population and territories from natural and man-made emergencies // Technologies of civil safety. 2020. – №. 4 (68). – pp. 30-37.

3. Kotosonov A.S., Arefyeva E.V., Prus Yu.V. Integral risk indicators of natural and man-made emergencies in geographically distributed natural and technical systems // Technologies of civil safety. 2024. – №. 1 (79). – pp. 27-33.

4. World risk report 2022 BündnisEntwicklungHilft Ruhr University Bochum -Institute for International Law of Peace and Armed Conflict (IFHV).

5. Arefyeva E.V., Prus Yu.V., Kotosonov A.S. An approach to assessing the sustainability of life support systems of the population // Civil security technologies. 2024. – №. 4 (82). – pp. 63-69.

6. Arefyeva E.V., Muravyeva E.V., Kotosonov A.S., Poltoranov D.V., Kuzmin A.V. Analysis of approaches and methods of forming integral risk indices when working with security passports of the territories of subjects // Technologies of civil safety. 2023. – №. 3 (77). – pp. 50-58.

7. Oltyan I.Y. Remote assessment of an integrated emergency risk index / Oltyan I.Y., Arefyeva E.V., Kotosonov A.S. // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering: International Conference on Construction, Architecture and Technosphere Safety. Sochi: IOP Publishing Ltd. 2020. Vol.962. P. 042053. DOI 10.1088/1757-899X/962/4/042053. EDN XJGGYQ.

8. Voronin A.A., Prus Yu.V. Mathematical recognition of emergency situations using sensor systems and interaction with emergency response services // Proceedings of the XXXI International Conference "Security management problems of complex systems": collection of articles / edited by Kalashnikov A.A., Kulba V.V. Moscow: Publishing House of IPU RAS. 2023. Ch. 6. pp. 400-406.

Информация об авторах

Ю.В. Прус - доктор физико-математических наук, профессор

Information about authors

Yu.V. Prus - holder of an Advanced Doctorate in Physico-mathematical Sciences, Professor

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article. The authors declare no conflict of interest.

Статья поступила в редакцию 23.01.2025, одобрена после рецензирования 10.03.2025, принята к публикации 20.03.2025.

The article was submitted 23.01.2025, approved after reviewing 10.03.2025, accepted for publication 20.03.2025.