

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ НА СТЕПЕНЬ ОПАСНОСТИ ВОЗНИКНОВЕНИЯ АВАРИЙ НА ПОДЗЕМНЫХ ТРУБОПРОВОДАХ В САНКТ-ПЕТЕРБУРГЕ С ПОМОЩЬЮ ИСКУССТВЕННЫХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ

Н. В. Гусева¹, В. А. Киселев¹

¹ Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Россия

Аннотация: рассмотрена актуальная проблема оценки влияния инженерно-геологических факторов на возникновение аварий на подземных трубопроводах, приведен пример создания карты районирования территории мегаполисов. На основе анализа литературных источников составлен перечень инженерно-геологических факторов, оказывающих влияние на возможность возникновения аварий на подземных трубопроводах, расположенных на территории Васильевского острова г. С.-Петербурга, и предложен метод оценки влияния этих факторов на степень опасности аварий на подземных трубопроводах. Оценка проводилась с использованием искусственной нейронной сети, которая была обучена на основе зарегистрированных аварий. Непосредственный расчет весовых коэффициентов выполнялся методом Гарсона (Garson G.D.) Полученные оценки весовых коэффициентов позволили (в условиях конкретного района) подразделить факторы на три группы: тектонические нарушения, подземные воды, биогазы и остальные, а также указать их степень влияния. Оценки значимости факторов были использованы для создания карты районирования территории по степени опасности возникновения аварий на подземных трубопроводах. Представленные в статье результаты позволяют сделать вывод об их практической значимости, состоящей в возможности их применения при проектировании и эксплуатации подземных коммуникаций, и не только трубопроводов.

Ключевые слова: мегаполис, трубопроводы, аварии, факторы, искусственные нейронные сети, веса, районирование, территория, прогноз.

Для цитирования: Гусева Н. В., Киселев В. А. Оценка влияния инженерно-геологических факторов на степень опасности возникновения аварий на подземных трубопроводах в Санкт-Петербурге с помощью искусственных нейронных сетей // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2024. – № 11–1. – С. 171–186. DOI: 10.25018/0236_1493_2024_111_0_171.

Assessment of the geological factors influence on the danger degree of accidents on underground pipelines in St. Petersburg using artificial neural networks

N. V. Guseva¹, V. A. Kiselev¹

¹ Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University, Russia

Abstract: The article considers the actual problem of engineering and geological factors impact on the occurrence of accidents on underground pipelines and the creation of a zoning map of the territory of megacities. Based on the literary sources analysis, a list of engineering and geological factors influencing the possibility of accidents on underground pipelines located on the Vasilievsky Island in St. Petersburg has been compiled. The article a method for assessing the influence of factors on the degree of danger of accidents on underground pipelines has been proposed. The assessment was carried out using an artificial neural network (ANN), which was trained based on recorded accidents. The direct calculation of the weighting coefficients was performed by the Garson method (Garson G. D.). The estimates of the weighting coefficients made it possible, in the particular area conditions, to divide the factors into three groups: tectonic disturbances; groundwater, biogas and others, as well as to indicate their influence degree. The factors significance assessments were used to create a zoning territory map according to the accidents on underground pipelines danger degree. The results presented in the article allow us to conclude about their practical significance, which consists in the possibility of their application in the design and operation of underground utilities, and not only pipelines.

Key words: megapolis, pipelines, accidents, factors, artificial neural networks, weights, zoning, territory, forecast.

For citation: Guseva N. V., Kiselev V. A. Assessment of the geological factors influence on the danger degree of accidents on underground pipelines in st. Petersburg using artificial neural networks. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2024;(11-1):171–186. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2024_111_0_171.

Введение

Высокая плотность застройки территорий современных мегаполисов и ограниченная возможность их экстенсивного территориального развития привели к необходимости интенсивного использования имеющегося пространства, в том числе и подземного. Рациональное использование данного ресурса должно, с одной стороны, обеспечить эффективное функционирование производственной сферы города, а с другой — предоставить жителям комфортную и безопасную среду обитания. В этой связи эксплуатация подземного пространства должна сопровождаться анализом его состояния, т.к. оно оказывает существенное влияние на функциональные возможности подземных сооружений. Нарушение работы указанных сооружений может привести к возникновению аварийных ситуаций не только на подземных объектах, но и объектах на земной поверхности.

Из всех объектов, находящихся в подземном пространстве городов,

наиболее протяжёнными являются подземные трубопроводы. В частности, по сведениям Петербургского сетевого издания «Фонтанка.ru», в эксплуатации АО «Теплосеть Санкт-Петербурга» имеется 700 км магистральных трубопроводов и около 1800 км — внутриквартальных, они распределены по 11 районам города и во Всеволожском районе Ленобласти. Как показывает статистика, современное состояние подземных трубопроводов на территории Санкт-Петербурга характеризуется определенным количеством технологических нарушений. Так, в Санкт-Петербурге за «сезон 2022–2023 гг. произошло 4434 нарушения». Городское руководство постоянно проводит работы по обеспечению нормального функционирования коммуникаций. Однако, несмотря на ежегодное увеличение финансирования профилактических и ремонтных работ, проблема аварийности на объектах подземного пространства мегаполиса остается и требует своего разрешения. Одним

из путей выхода из сложившейся ситуации является создание прогнозной карты территории города, на основании анализа которой можно установить основные причины и места возможных аварий, объемы работ и их финансирования.

В настоящее время в области прогноза аварий на трубопроводах отмечается два направления: прогноз состояний трубопроводов — одномерная (линейная) задача (прогноз мест аварий) [1] и прогноз состояний территории по степени опасности возникновения аварий на трубопроводах путем создания карт районирования — двумерная задача [2, 3]. Каждое направление характеризуется своим набором учитываемых факторов и степенью их влияния (весами). Принимая во внимание необходимость обработки большого объема информации, для решения этих задач широкое распространение получили компьютерные технологии и, в частности, искусственные нейронные сети. Так, например, в статье Земенковой М. Ю. и др. установлено, что рекуррентные нейронные сети могут быть с высокой степенью эффективности использованы для прогнозирования техногенных событий и параметров процессов на стационарных объектах и линейных участках магистрального транспорта углеводородов, что позволяет оперативно, в режиме реального времени, выполнять интеллектуальный мониторинг событий [4, 5]. В статье Тимашева С. А. дана оценка интенсивности отказов, вероятности безотказной работы и коэффициента готовности городской водопроводной сети [6]. Для решения двумерной задачи и построения прогнозной карты территории Биденко С. И. и др. исследовали возможности применения искусственной нейронной сети (ИНС) для территориальной дифференциации

методами ДДЗ-геоизображений Обской губы [7]. Однако полученные результаты анализа территориальных границ и зон на примере космических снимков носят слишком обобщенный характер. В работе Татаринова В. Н. и др. рассмотрены методологические аспекты применения ИНС для задач геодинамического районирования территорий при выборе мест размещения экологически опасных объектов (на примере объектов ядерного топливного цикла) [8]. При анализе использована только одна группа влияющих факторов: растяжения, сжатия, зоны накопления упругой энергии и т. д. В статье Ермолаева О. П. и Селиванова Р. Н. разработаны методические подходы по урболандшафтному картографированию территории крупного города с использованием ИНС Кохонена [9]. В результате были составлены тематическая классификации рельефа и урбаноландшафтная карта территории. Однако в работе отсутствует районирование по степени опасности территории. Для выявления пространственно-однородных участков ландшафтных структур урбогеосистемы в статье Дубровской С. А. и Ряхова Р. В. была изложена методика построения урбоэколандшафтной картографической модели Волгограда с использованием геоморфометрических данных и методики автоматизированной классификации ИНС [10]. Анализ представленных выше литературных источников показал, что авторы основной упор в своих исследованиях сделали на прогноз мест возникновения аварий на трубопроводах. В то же время, вопрос об оценке степени влияния конкретных факторов на возникновение аварий или вовсе не рассматривался, или это было сделано недостаточно полно. Между тем данный вопрос является важным, поскольку от ответа на него зави-

сит понимание процессов, связанных с формированием условий возникновения аварий, объективность прогноза их возникновения и разработка мероприятий по их предотвращению.

Исходя из вышеизложенного, следует сделать вывод о том, что на территории С.-Петербурга возникают аварии при эксплуатации подземных трубопроводов, вызванные инженерно-геологическими факторами. Однако на сегодняшний день нет способа оценки степени влияния каждого фактора, и отсутствуют карты районирования территории по прогнозной степени опасности возникновения аварий. Указанные обстоятельства обусловили актуальность работы по оценке степени влияния каждого фактора и создания карты районирования территории по степени опасности возникновения аварий.

Цель исследования — оценка влияния инженерно-геологических факторов на возникновение аварий на подземных трубопроводах и создание карты районирования территории исторической застройки Васильевского острова С.-Петербурга по степени аварийной опасности подземных трубопроводах.

Предмет исследования — закономерности взаимного соотношения весов и пространственной сочетаемости инженерно-геологических факторов, влияющих на степень опасности возникновения аварий на подземных трубопроводах в районе исторической застройки Васильевского острова С.-Петербурга.

Задачи исследования: выявление и обоснование инженерно-геологических факторов, вызывающих аварии трубопроводов; обучение ИНС на основе зафиксированных аварий; оценка весов влияющих факторов; построение прогнозной карты районирования территории участка исторической застройки Васильевского острова С.-Петербурга по степени опасности

возникновения аварий на подземных трубопроводах.

Методика исследования

Для решения первой задачи работы, состоящей в выявлении и обосновании инженерно-геологических факторов, вызывающих аварии трубопроводов, использовались: карта геоактивных зон, составленная Е. К. Мельниковым по заказу Комитета по градостроительству и архитектуре мэрии Санкт-Петербурга; координаты аварий на подземных коммуникациях водопроводной и канализационной сетей по данным ГУП «Водоканал Санкт-Петербурга», ТГК-1, ГУП ТЭК СПб; специальные карты по отдельным инженерно-геологическим показателям; анализ литературных источников, в которых рассматривались инженерно-геологические факторы и их сочетание.

Следующими задачами работы являлись: оценка весов влияющих факторов и построение прогнозной карты районирования исследуемой территории.

Прогнозирование любых событий, включая аварии на подземных трубопроводах, основано на вероятностном подходе. Вероятность возникновения события в определенной точке пространства зависит от комбинации определенных условий. Для этого строится модель вероятности того, что зависящая переменная примет значение 1 при заданных значениях независимых переменных. Для моделирования вероятности бинарной зависимой переменной применяется логистическая функция, которая является монотонно возрастающей, и может принимать значения от 0 до 1 [11]. Она имеет вид

$$y = \frac{1}{1 + e^{-x}}, \quad (1)$$

где x — логит.

Логит позволяет линеаризовать связь между переменными X и вероятностями y . В этом случае у нас есть линейное сочетание различных переменных, таких как свободный член (нулевое значение — смещение), коэффициенты регрессии (ω_i — веса) и предикаты (x_i). Значения константы и коэффициентов определяются путем решения задачи минимизации функции потерь логистической регрессии с использованием различных методов оптимизации (например, градиентный спуск). Таким образом, мы можем вычислить вероятность как функцию независимых переменных и их весов.

$$y = \frac{1}{1 + e^{-(\omega_1 x_1 + \omega_2 x_2 + \dots + \omega_n x_n)}}, \quad (2)$$

где y — вероятность возникновения аварий (от 0 до 1); x_1, x_2, \dots, x_n — значения факторов; $\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n$ — веса факторов.

Для определения весов предлагается использовать зарегистрированные аварии на трубопроводах, измеряя при этом значения факторов. В качестве средства прогноза предлагается применить ИНС.

Основными компонентами искусственной нейронной сети являются нейроны, объединенные в многослойную структуру. Нейрон — это основная единица обработки информации в такой сети. Каждый искусственный нейрон состоит из входных сигналов (x_i), которые представляют значения различных факторов, весов (ω_i), применяемых к входным сигналам, и сумматора Σ , который суммирует взвешенные входные сигналы (рис. 1) [12].

В математическом представлении функционирование нейрона k описывается следующими уравнениями [12]:

$$u_k = \sum_{i=1}^m \omega_{ki} x_i; \quad (3)$$

$$y_k = \phi(u_k + b_k), \quad (4)$$

где x_i — входные сигналы; ω_i — веса синапсов нейрона k ; u_k — линейная комбинация входных воздействий; b_k — порог — байс (**bias — смещение**, сдвиг начала отсчета функции активации); $\phi(\cdot)$ — функция активации; y_k — выходной сигнал нейрона.

Постсинаптический потенциал

$$v_k = u_k + b_k. \quad (5)$$

Принимая во внимание (5), выражения (3) и (4) преобразуются к следующему виду [12]:

$$v_k = \sum_{i=1}^m \omega_{ki} x_i; \quad (6)$$

$$y_k = \phi(v_k). \quad (7)$$

При этом в выражении (6) добавится новый синапс $x_0 = +1$, а его вес: $\omega_{k0} = b_k$. В этом случае появляется возможность сформировать эквивалентную (рис. 1, а) схему нейрона (рис. 1, б).

Функции, которые показывают, как нейрон реагирует на входной сигнал, обозначаются как $\phi(v_k)$. Они определяют активацию нейрона в зависимости от локального поля v . Среди трех основных типов функций активации наиболее распространена сигмоидальная или логистическая функция. Эта функция определяется следующим образом [12]:

$$\phi(v) = \frac{1}{1 + e^{-av}}, \quad (8)$$

где a — параметр наклона сигмоидальной функции.

В качестве исходных данных для прогноза были приняты координаты фиксации мест возникновения аварий на трубопроводах и карты: расположения тектонических разломов (по Мель-

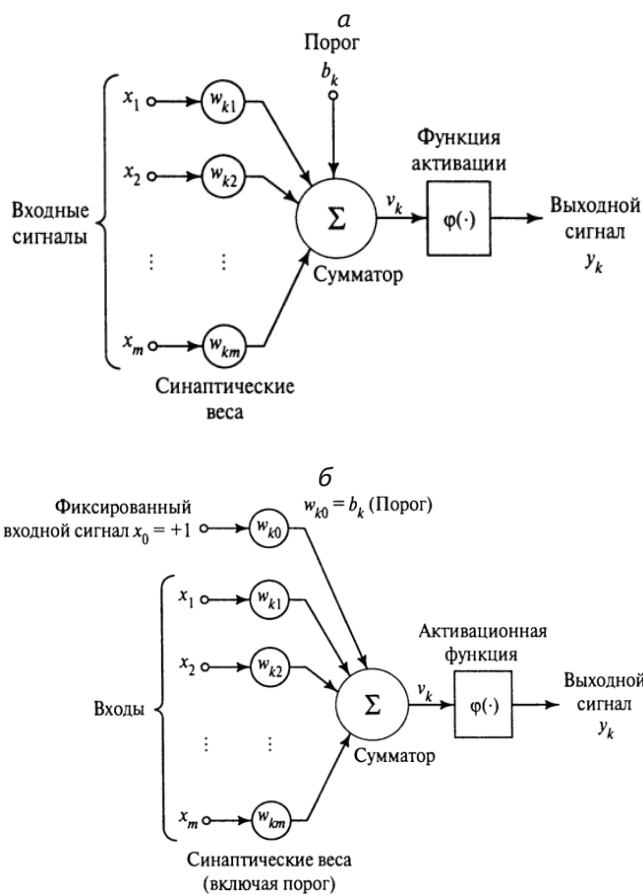


Рис. 1. Нелинейная модель искусственного нейрона [12]: а – схема искусственного нейрона; б – модифицированная схема искусственного нейрона
 Fig. 1. Nonlinear artificial neuron model [12]: a – artificial neuron schema; b – modified artificial neuron schema

никову Е. К.); расположения подземных вод; погребенных русел рек; каналов; болот; биогазов в границах исторической застройки Васильевского острова от его стрелки до 26–27 линий. Перед применением сформированная ИНС проходит этап обучения. В качестве обучающих алгоритмов используют алгоритмы с учителем и без учителя. При этом употребляются различные методы оптимизации, наиболее распространенным среди которых является алгоритм error backpropagation, BackProp RPROP (обратного распространения ошибки).

Для оценки влияния инженерно-геологических факторов на степень опасности возникновения аварий, т. е. оценки весов факторов использовался алгоритм Гарсона (Garson G. D.) [13].

В связи с необходимостью обработки большого количества графического материала для решения поставленных задач использовался программный комплекс, состоящий из ArcGIS 10.0 (ArcGIS 10.0 Desktop, бессрочная лицензия, контр. от 06.12.2021) и Advangeo® 2.0.3.0. (пост. ООО Альфа Мобиле, бес-

срочная лицензия, контр. ГК 613–07/13 от 31.07.2013).

Результаты

В результате анализа литературных источников в работе были рассмотрены следующие группы факторов: тектоническая нарушенность и трещиноватость; эманации газов из зон разломов; гидрологические условия; глубина залегания подземных вод и водонасыщенность пород; наличие палеодолин, погребенных болот и каналов; напряжённо-деформированное состояние толщи пород.

Так, необходимость рассмотрения тектонической нарушенности и трещиноватости подземного пространства С.-Петербурга обусловлена тем, что его территория, приуроченная к узлам пересечения разнонаправленных разломов каледонского, герцинского, альпийского, а также современного времени их активизации, представляет собой структуру, раздробленную на блоки разных размеров [14]. Данные блоки имеют определенные скорости и амплитуды знакопеременных движений в вертикальном направлении или сдвиговые деформации по зонам разломов [15, 16].

Непосредственно с фактором тектонической нарушенности связан фактор эманации газов из зон разломов — радоноопасность. Как указывал Васильев Г. Г., анализируя причины возникновения деформаций инженерных сооружений объектов газового комплекса, эманации подпочвенного радона приводят к деформационным нарушениям в трубопроводах, при этом направления воздействующих напряжений зависят от пространственной ориентации тектонических нарушений [17].

Еще одна группа факторов, требующая анализа, связана с гидрологическими условиями, такими, как глубина

залегания подземных вод и водонасыщенность пород, в которых располагаются трубопроводы. Воздействие указанных факторов на основания сооружений рассматривались в работах Дашко Р. Э. при проведении инженерно-геологического анализа и оценки водонасыщенных глинистых пород верхнекотлинских глин венда [18].

Определенное воздействие на гидрогеологические условия оказывают наличие палеодолин и погребенных болот, которые широко распространены на территории С.-Петербурга. Глубина погребенных долин, заполненных четвертичными осадками различного генезиса, в самой нижней точке может достигать 40–120 м; ширина варьирует в пределах 1800–3500 м, крутизна склонов — в пределах 12–15°, реже 18°, в верхней части — менее 10°. Тальвеги самых глубоких долин находятся на абсолютных отметках до –110 м [19, 20]. Погребённые болотные массивы являются потенциально опасными в отношении биохимической газогенерации (метан, углекислый газ, сероводород) [21].

Еще одним фактором, вызывающим деформации подземных трубопроводов является фактор напряжённо-деформированного состояния толщи пород, обусловленного гидродинамическим режимом водоносных горизонтов и воздействием напорных вод. Кроме того, определенное влияние на состояние трубопроводов оказывает минерализация воды. В пределах территории С.-Петербурга минерализация вод изменяется от 3,5 до 5 г/дм³, а в зонах тектонических разломов может превышать 5–6 г/дм³ [21].

Определенное деформационное воздействие на подземные трубопроводы оказывают деформации земной поверхности и массива пород оснований, возникающие при строительстве зданий

и подземных сооружений, таких как: тоннели; подземные гаражи, торговые центры и т.п. Вокруг оснований указанных объектов возникают зоны деформаций грунтового массива и земной поверхности [22].

С целью подготовки исходных данных для обучения ИНС в среде ArcGIS 10.0 указанного программного комплекса был сформирован ГИС-проект (ГИС — геоинформационная система). В рамках проекта были созданы следующие карты: тектонические нарушения с зонами их влияния, при этом тектонические нарушения были подразделены на 3 группы; русла погребённых рек и зоны их влияния; русла погребённых каналов и зоны их влияния; погребённые болота; глубина подземных вод; области образования биогазов.

Внутри области обучения ИНС были отмечены места зафиксированных аварий на подземных трубопроводах, предоставленные Мельниковым Е. К. (рис. 2).

Сформированные карты были переданы в программу и Advangeo® 2.0.3.0 для обучения нейронной сети. В процессе обучения программой была сформирована искусственная нейронная сеть из 3 слоев и 29 нейронов, из которых 9 (по количеству влияющих факторов) расположены на входном слое и 1 — на выходном слое, 19 нейронов расположены на скрытом промежуточном слое. Топология сети представлена следующим сочетанием 9–19–1. Всего было образовано 190 связей. В качестве активационной функции была принята сигмоидальная кривая с крутизной 0,5, а в качестве обучающего алгоритма — алгоритм с обратным распространением ошибки (RPROP). При обучении всего было реализовано 100 эпох, с условием остановки СКО (среднеквадратическое отклонение) < 0,001.

На этапе обучения программа показала следующие результаты: среднее значение 0,31; максимальное значение

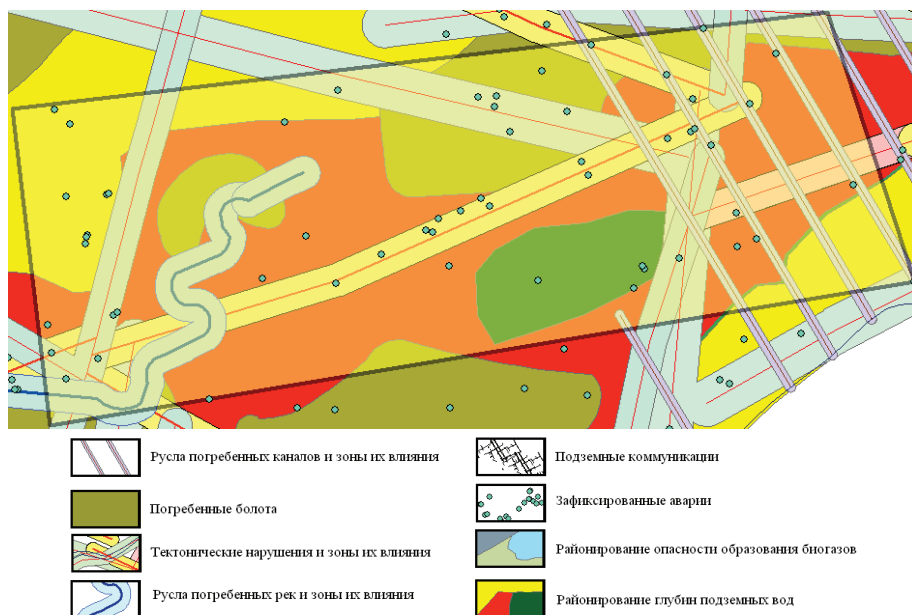


Рис. 2. Область обучения на территории Васильевского острова

Fig.2. The field of study on the Vasilievsky Island territory [составлено авторами]

0,86; минимальное значение 0,00; стандартное отклонение 0,14.

Для оценки степени влияния инженерно-геологических факторов на степень опасности возникновения аварий в качестве исходных данных были приняты значения весовых коэффициентов соединений между

входными (Input), скрытыми (Hidden) и выходным (Output) нейронами, полученные в результате обучения ИНС в Advangeo® 2.0.3.0 (табл. 1).

Для вычисления степени влияния (весовых коэффициентов) инженерно-геологических факторов на степень опасности возникновения аварий был

Таблица 1

Значения весов соединений между входными (Input), скрытыми (Hidden) и выходным (Output) нейронами [составлено авторами]

Values of weights for connections between Input, Hidden and Output neurons

Номера нейронов во входном слое	Номера нейронов в скрытом слое																		
	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28
1	-2,5	1,3	-37,8	-5,1	3,8	14,5	1,0	7,7	0,0	0,4	8,1	-0,4	-2,9	1,2	14,0	-3,6	1,4	-31,8	-42,5
2	-2,4	-0,3	0,9	-5,6	0,1	1,0	-0,8	0,4	1,5	0,2	1,1	0,3	-5,0	0,5	-1,5	-10,0	-0,1	-0,26	-1
3	-11,8	7,3	13,7	-0,4	7,9	24,2	-3,3	-0,1	-5,2	-3,1	55,9	-0,8	-1,9	1,1	142,8	-2,0	1,2	-12,2	10,33
4	-0,9	3,3	11,6	0,5	7,0	7,5	3,1	-0,5	-1,6	1,1	6,2	0,7	0,2	2,5	6,4	2,8	3,4	1,64	0,31
5	66,3	-33,4	4,1	-61,2	-44,3	3,7	-32,8	1,1	-4,1	1,0	1,6	2,9	8,0	5,1	1,9	22,3	5,7	3,78	-63,3
6	-3,0	-3,8	-26,5	2,1	-20,8	5,6	-5,4	5,8	8,7	-6,7	5,8	-6,0	0,3	-10,3	5,6	2,5	1,6	-5,39	-1,28
7	1,4	0,3	-5,8	-0,2	-2,2	16,4	5,0	0,8	-4,1	0,3	8,3	2,9	-1,8	0,8	8,3	-1,6	3,1	-9,34	-2,06
8	-6,3	0,2	-0,9	-3,2	-3,0	6,8	3,9	-1,4	-0,8	0,7	3,5	0,9	-6,7	0,1	3,7	-8,3	2,5	0,47	-0,75
9	0,4	-0,6	-0,9	-5,6	0,0	-0,5	-3,5	0,7	-1,1	-0,5	1,1	-0,9	-4,0	-0,6	1,2	-8,6	-3,5	-0,7	-1,67
Output	0,5	0,3	44,5	0,4	-0,7	0,8	-0,4	-1,1	0,5	-0,7	0,4	3,9	0,4	-0,6	-16,3	0,6	0,5	0,64	-0,69

Таблица 2

Весовые коэффициенты факторов [составлено авторами]

Weight coefficients of factors

N	Весовые коэффициенты ω	Наименования факторов
1	0,130	Биогазы
2	0,033	Болота
3	0,167	Подземные воды
4	0,056	Тектонические нарушения Т1
5	0,284	Тектонические нарушения Т2
6	0,161	Тектонические нарушения Т3
7	0,071	Погребенные руса рек
8	0,055	Погребенные каналы
9	0,043	Палеодолины
Sum	1,000	

применен метод Гарсона (Garson G. D.) [13]. Результаты оценки весовых коэффициентов представлены в табл. 2.

По результатам выполненных работ была построена карта районирования участка исторической застройки Васильевского острова С.-Петербурга по степени опасности возникновения аварий на подземных трубопроводах (рис. 3).

Обсуждение результатов

Из представленных в табл. 2 результатов видно, что основной вклад в процесс подготовки аварий на подземных трубопроводах на Васильевском острове в С.-Петербурге вносят тектонические нарушения. Их суммарный вклад составил 50% от общего вклада других факторов. Следующими по степени влияния являются факторы: подземные воды — 16,7%; биогазы — 13%. Полученное соотношение, на наш взгляд, объясняется тем, что тектонические нарушения являются особой средой, характеризующейся не только возможностью механического воздействия на объекты за счет неравномерного смещения в зоне нарушения, но и способной проводить через себя газовые эманации, водные растворы и т.п. Первостепенность вклада тектонических нарушений явно прослеживается и на карте районирования территории по степени опасности, что позволяет рассматривать полученный результат как новое, ранее неотмечаемое, явление. Ранее предполагалось, что основной вклад в возникновение аварий вносят факторы, связанные с подземными водами, болотами и т.п. На основе анализа карты была выявлена закономерность совпадения мест возникновения аварий на трубопроводах с зонами влияния тектонических нарушений и особенно с узлами их пересечений. В то же время влияние остальных факторов

значительно меньше. Достоверность построенной модели прогнозирования была подтверждена сравнением полученных участков с высокой степенью опасности (красный цвет) на карте с реальными местами зарегистрированных аварий на трубопроводах (см. рис. 3). Из рисунка видно, что зафиксированные аварии в основном попадают в зоны повышенной опасности.

Полученный перечень факторов носит неокончательный характер, предполагается его дополнение для повышения точности прогнозов. В дальнейшем необходимо изучить и учесть влияние факторов, действующих в следующих местах прокладки трубопроводов: на участках со слабыми грунтами; в зонах повышенной трещиноватости, проницаемых для поступающих с глубины вод и газовых эманаций [23], т.к. указанные процессы способствуют повышению агрессивности приповерхностных грунтовых вод к металлоконструкциям, что приводит к развитию коррозионных повреждений [24]; на участках дифференцированных тектонических движений по разломам, фиксируемых нивелирными наблюдениями; в зонах развития пльвунов; на участках, подверженных затоплению; в зонах естественных оседаний и поднятий земной поверхности; в зонах развития мюльд оседания при строительстве тоннелей [25] и высотных зданий; на подъемах территорий подсыпкой или намывом, образованием слоев техногенных грунтов (намытых песков, отвалов грунта, золы, городского мусора и др.); в зонах техногенного загрязнения подземной среды; в зонах понижения уровня подземных вод, вызывающих развитие процессов гниения торфа, органических включений в грунте и деревянных элементов подземных конструкций; в зонах линий электропередач различной мощности,

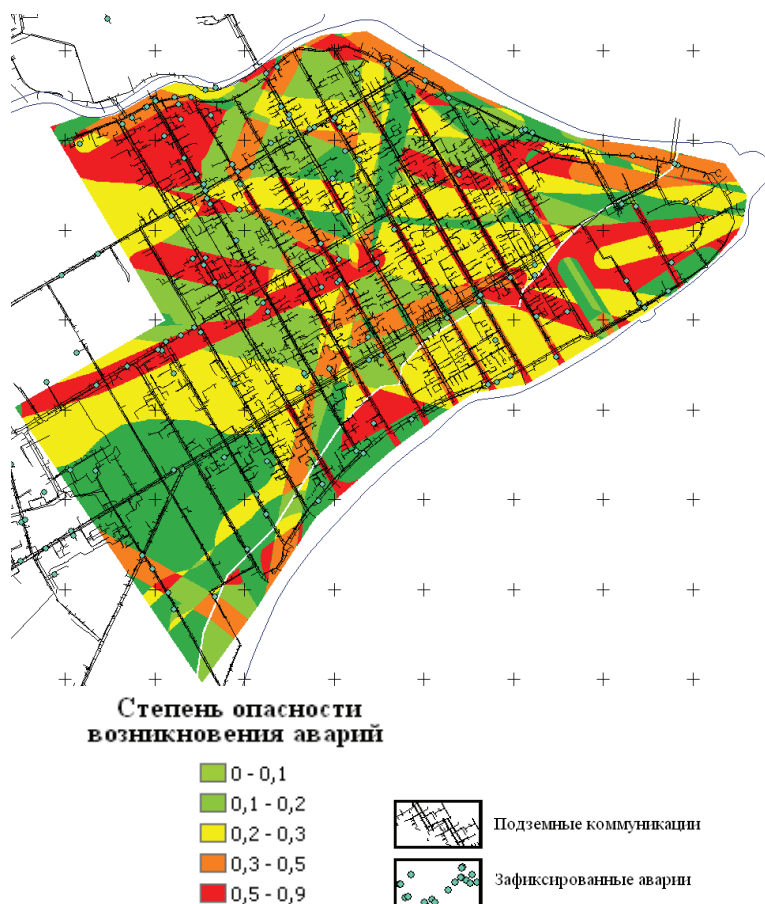


Рис. 3. Схема районирования территории исторической застройки Васильевского острова по 6 факторам [составлено авторами]

Fig. 3. The zoning territory scheme of the historical development Vasilyevsky Island according to 6 factors

которые вызывают коррозию трубопроводов, вызванную влиянием геомагнитно-индуцированного источника блуждающего тока [26]; в зонах динамического воздействия на грунты (влияния вибрации от движущегося транспорта).

Выводы

В работе на основании анализа литературных источников составлен перечень инженерно-геологических факторов, оказывающих влияние на возможность возникновения аварий

на подземных трубопроводах, расположенных на территории Васильевского острова г. С.-Петербург. Представленный перечень носит неокончательный характер и может быть изменен, однако на данном этапе работы его можно принять для выполнения прогноза. Полученные оценки весовых коэффициентов факторов позволяют их подразделить на три группы: первая группа — тектонические нарушения с суммарной степенью влияния 50%; вторая — подземные воды и биогазы с суммарным влиянием 29,7% и третья — остальные.

Анализ карты районирования территории по степени опасности возникновения аварий на подземных трубопроводах показал, что максимальные значения степени опасности возникновения аварий приурочены к зонам влияния тектонических нарушений и узлам их пересечения. Полученные результаты позволяют сделать вывод об их практической значимости, состоящей в возможности их применения при проектировании и эксплуатации подземных коммуникаций, и не только

трубопроводов, при этом, особое внимание следует уделять выявлению и учету тектонических нарушений.

Вклад авторов

Гусева Н. В., к.т.н. сбор и подготовка исходных данных, создание ГИС-проекта; Киселев В. А., к.т.н. — разработка методики, проведение обучения ИНС, анализ полученных результатов.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Popov G., Bolobov V., Zhuikov I., Zlotin V.* Development of the Kinetic Equation of the Groove Corrosion Process for Predicting the Residual Life of Oil-Field Pipelines // *Energies*. 2023, 16(20). DOI: 10.3390/en16207067.

2. *Стручкова Г. П., Капитонова Т. А., Тарская Л. Е., Ефремов П. В.* Использование ГИС для оценки риска безопасности трубопроводов // *Фундаментальные исследования*. — 2014. — № 5-5. — С. 994-999.

3. *Александров О. Ю., Исупова Е. В., Агиней Р. В.* Обзор результатов исследования влияния геомагнитно-индуцированных токов на подземные магистральные нефтегазопроводы // *Защита окружающей среды в нефтегазовом комплексе*. — № 1. — С. 45-50.

4. *Земенкова М. Ю., Чижевская Е. Л., Земенков Ю. Д.* Интеллектуальный мониторинг состояний объектов трубопроводного транспорта углеводородов с применением нейросетевых технологий // *Записки Горного института*. 2022. Т. 258. С. 933-944. DOI: 10.31897/PMI.2022.105.

5. *Лютюв А. Г., Булатов А. Ф.* Метод расчета местоположения утечки в магистральном трубопроводе на основе нейронных сетей // *Нейрокомпьютеры: разработка, применение*. 2013. № 3. — С. 40-43.

6. *Тимашев С. А., Макеева Т. В.* Оценка надежности городской водопроводной сети при дефиците информации методом искусственных нейронных сетей: препринт. — Екатеринбург: Издательство Уральского университета, 2023.— 78 с.

7. *Биденко С. И., Гаевская З. А., Храмов И. С.* Пространственный ИНС-анализ и дифференциация территориальных структур в процедурах оперативного районирования на основе данных дистанционного зондирования // *ИНФОРМАЦИЯ И КОСМОС*. 2021. № 4, — С. 107-113.

8. *Татаринев В. Н., Маневич А. И., Лосев И. В.* Системный подход к геодинамическому районированию на основе искусственных нейронных сетей. *Горные науки и технологии*. 2018;(3):14-25. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2018-3-14-25>.

9. *Ермолаев О. П., Селиванов Р. Н.* Автоматизированное ландшафтно-экологическое картографирование городских территорий с использованием нейронных сетей (на примере г. Казани) // *Том 152, кн. 4. Естественные науки*. 2010. С. 53-67.

10. *Дубровская С. А., Ряхов Р. В.* Картографическое моделирование урбандолиндов степной зоны России с использованием нейронных сетей // *Теоретическая и приклад-*

ная экология. Методология и методы исследований. Модели и прогнозы. 2021. No 1. С. 53–57. DOI: 10.25750/1995–4301–2021–1-053–057.

11. Пампел Ф., Груздев А. В., Цвиркун Д. Логистическая регрессия. — М. — ДМК Пресс, 2023, 218 с.

12. Хайкин С. Нейронные сети: полный курс, 2-е издание.: Пер. с англ. — М.: Издательский дом «Вильямс», 2006. — 1104 с.

13. Julian D. O., Donald A. J. Illuminating the “black box”: a randomization approach for understanding variable contributions in artificial neural networks // Ecological Modelling. Vol. 154, Iss. 1, p. 135–150. DOI: 10.1016/S0304–3800(02)00064–9.

14. Ревазов А. М., Лежнев М. А. Влияние аварий на объектах трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов на окружающую среду // Защита окружающей среды в нефтегазовом комплексе. 2021. No 6 (303). С. 12–17. DOI: 10.33285/2411–7013–2021–6(303)–12–17.

15. Мастобаев Б. Н., Аскарлов Р. М., Китаев С. В., Рафиков С. К., Усманов Р. Р., Чучкалов М. В., Исламов И. М. Выявление потенциально опасных участков магистральных газопроводов на пересечениях с геодинамическими зонами // Трубопроводный транспорт: теория и практика. 2017. No 3 (61). С.38–43.

16. Аскарлов Р. М., Валеев А. Р., Исламов И. М., Тагиров М. Б. Оценка влияния геодинамических зон, пересекающих магистральные газопроводы, на их напряженно-деформированное состояние // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2019. Т. 330. No 11. С. 145–154. DOI: 10.18799/24131830/2019/11/2358.

17. Васильев Г. Г., Джалабов А. А., Леонович И. А. Анализ причин возникновения деформаций инженерных сооружений объектов газового комплекса в криолитозоне // Записки Горного института. 2021. Т.249. С.377–385. DOI:10.31897/PMI.2021.3.6.

18. Дашко Р. Э., Лохматиков Г. А. Верхнекотлинские глины Санкт-Петербургского региона как основание и среда уникальных сооружений: инженерно-геологический и геотехнический анализ // Записки Горного института. 2022. Т.254. С.180–190. DOI:10.31897/PMI.2022.13.

19. Буданов Л. М. Особенности пространственного распределения древних погребённых долин Невской губы / Комплексные исследования Мирового океана. Материалы V Всероссийской научной конференции молодых ученых, г. Калининград, 18–22 мая 2020 г. С. 308–309. [Электронный ресурс]. — Калининград: АО ИО РАН. — Режим доступа: <http://atlanticnew.ocean.ru/index.php/raznoe/item/425-v-vserossijskaya-nauchnaya-konferentsiya-molodykhuchenykh-kompleksnye-issledovaniya-mirovogo-okeana>.

20. Буданов Л. М., Сенчина Н. П., Шнюкова О. М., Горелик Г. Д. Исследование палеовреза с помощью гравиметрических наблюдений // Геосистемы переходных зон. 2020, No 4(3) С. 288–296.

21. Дашко Р. Э., Александрова О. Ю., Котюков П. В., Шидловская А. В. Особенности инженерно-геологических условий Санкт-Петербурга // Развитие городов и геотехническое строительство, выпуск No 1/2011. С. 1–34.

22. Komolov V., Belikov A., Kankhva V., Mezina N., editors. Assessment of the impact of the construction of semi-buried structures on the surrounding buildings and the road system. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering; 2020: IOP Publishing. DOI: 10.1088/1757–899X/918/1/012027.

23. Конищев К. Б., Семёнов А. М., Чабан А. С., Лобанова Н. А., Кашковский Р. В. Особенности механизма коррозионного растрескивания под напряжением металла

труб в средах, содержащих сероводород и диоксид углерода // Вести газовой науки. 2019. No 3 (40). С. 60–66.

24. Protosenya A. G., Karasev M. A., Verbilo P. E. The prediction of elastic-plastic state of the soil mass near the tunnel with taking into account its strength anisotropy // International Journal of Civil Engineering and Technology. 2017. Vol. 8. Iss.11. P. 682–694.

25. Volokhov E. M., Kireeva V. I. Analysis of the results of field studies of geomechanical processes in construction of large transport tunnels with the use of a mechanized tunnelboring complex with work face earth pressure balance in the special conditions of voids compensation in the rock massif // ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences. 2017. Vol. 12. Iss. 20. P. 5811–5821.

26. Агине́й Р. В., Исупова Е. В., Гуськов С. С., Мусонов В. В. Теоретическая оценка скорости коррозии магистральных трубопроводов, вызванной влиянием геомагнитно-индуцированного источника блуждающего тока // Наука и техника в газовой промышленности. 2020. No 4. С. 62–73. **ИВАБ**

REFERENCES

1. Popov G., Bolobov V., Zhuikov I., Zlotin V. Development of the Kinetic Equation of the Groove Corrosion Process for Predicting the Residual Life of Oil-Field Pipelines // Energies. 2023, 16(20). DOI: 10.3390/en16207067.

2. Struchkova G. P., Kapitonova T. A., Tarskaya L. E., Efremov P. V. Using GIS to assess pipeline safety risk // Fundamental Research. — 2014. — No. 5–5. — pp. 994–999. [In Russ].

3. Alexandrov O. Yu., Isupova E. V., Aginey R. V. Review of the results of the study of the influence of geomagnetic-induced currents on underground main oil and gas pipelines // Environmental protection in the oil and gas complex. — 2017. — No. 1. — pp. 45–50. [In Russ].

4. Zemenkova M. Yu., Chizhevskaya E. L., Zemenkov Yu. D. Intelligent monitoring of the conditions of hydrocarbon pipeline transport facilities using neural network technologies // Journal of Mining Institute. 2022. Vol. 258. pp. 933–944. [In Russ]. DOI: 10.31897/PMI.2022.105.

5. Lyutov A. G., Bulatov A. F. A method for calculating the location of a leak in a main pipeline based on neural networks // Neurocomputers: development, application. 2013. No. 3, pp. 40–43. [In Russ].

6. Timashev S. A., Makeeva T. V. Assessment of the reliability of the urban water supply network with a shortage of information by the method of artificial neural networks: preprint. — Yekaterinburg: Ural University Press, 2023. — 78 p. [In Russ].

7. Bidenko S. I., Gaevskaya Z. A., Khramov I. S. Spatial information analysis and differentiation of territorial structures in operational zoning procedures based on remote sensing data // INFORMATION and SPACE. 2021. No. 4. — Pp. 107–113. [In Russ].

8. Tatarinov V. N., Manevich A. I., Losev I. V. A systematic approach to geodynamic zoning based on artificial neural networks. Mining sciences and technologies. 2018;(3):14–25. [In Russ]. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2018-3-14-25>.

9. Ermolaev O. P., Selivanov R. N. Automated landscape and ecological mapping of urban areas using neural networks (on the example of Kazan) // Vol. 152, book 4. Natural Sciences 2010. — Pp. 53–67. [In Russ].

10. Dubrovskaya S. A., Ryakhov R. V. Cartographic modeling of urban landscapes of the steppe zone of Russia using neural networks // Theoretical and applied ecology. Methodology

and methods of research. Models and forecasts. 2021. No. 1. Pp. 53–57. [In Russ]. DOI: 10.25750/1995–4301–2021–1-053–057.

11. Pampel F., Gruzdev A. V., Tsvirkun D. Logistic regression. — M. — DMK Press, 2023, 218 p. [In Russ].

12. Haikin S. Neural networks: a complete course, 2nd edition.: Translated from English. — M.: Williams Publishing House, 2006. — 1104 p. [In Russ].

13. Julian D. O., Donald A. J. Illuminating the “black box”: a randomization approach for understanding variable contributions in artificial neural networks // Ecological Modelling. Vol. 154, Iss. 1, p. 135–150. DOI: 10.1016/S0304–3800(02)00064–9.

14. Revazov A. M., Lezhnev M. A. The impact of accidents at pipeline transportation facilities of oil and petroleum products on the environment // Environmental protection in the oil and gas complex. 2021. No. 6 (303). Pp. 12–17. [In Russ]. DOI: 10.33285/2411–7013–2021–6(303)-12–17.

15. Mastobaev B. N., Askarov R. M., Kitaev S. V., Rafikov S. K., Usmanov R. R., Chuchkalov M. V., Islamov I. M. Identification of potentially dangerous sections of main gas pipelines at intersections with geodynamic zones // Pipeline transport: theory and practice. 2017. No. 3 (61). Pp.38–43. [In Russ].

16. Askarov R. M., Valeev A. R., Islamov I. M., Tagirov M. B. Assessment of the influence of geodynamic zones crossing main gas pipelines on their stress-strain state // Izvestiya Tomsk Polytechnic University. Georesource engineering. 2019. Vol. 330. No. 11. Pp. 145–154. [In Russ]. DOI: 10.18799/24131830/2019/11/2358.

17. Vasiliev G. G., Dzhalyabov A. A., Leonovich I. A. Analysis of the causes of deformations of engineering structures of gas complex facilities in the cryolithozone // Journal of Mining Institute. 2021. Vol. 249. Pp.377–385. [In Russ]. DOI:10.31897/PMI.2021.3.6.

18. Dashko R. E., Lokhmatikov G. A. Verkhnekotlinsky clays of the St. Petersburg region as the foundation and environment of unique structures: engineering-geological and geotechnical analysis // Journal of Mining Institute. 2022. Vol. 254. Pp.180–190. [In Russ]. DOI:10.31897/PMI.2022.13.

19. Budanov L. M. Features of the spatial distribution of the ancient buried valleys of the Neva Bay./ Comprehensive research of the World Ocean. Proceedings of the V All-Russian Scientific Conference of Young Scientists, Kaliningrad, May 18–22, 2020, pp. 308–309. [Electronic resource]. — Kaliningrad: JSC IO RAS. — Access mode: <http://atlanticnew.ocean.ru/index.php/raznoe/item/425-v-vserossiyskaya-nauchnaya-konferentsiya-molodykhuchenykh-kompleksnye-issledovaniya-mirovogo-okeana>. [In Russ].

20. Budanov L. M., Senchina N. P., Shnyukova O. M., Gorelik G. D. Investigation of paleovision using gravimetric observations. Geosystems of transition zones. 2020, No. 4(3), pp. 288–296. [In Russ].

21. Dashko R. E., Alexandrova O. Yu., Kotyukov P. V., Shidlovskaya A. V. Features of engineering and geological conditions of St. Petersburg // Urban development and geotechnical construction, iss. no. 1/2011. Pp. 1–34. [In Russ].

22. Komolov V., Belikov A., Kankhva V., Mezina N., editors. Assessment of the impact of the construction of semi-buried structures on the surrounding buildings and the road system. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering; 2020: IOP Publishing. DOI: 10.1088/1757–899X/918/1/012027.

23. Konishchev K. B., Semenov A. M., Chaban A. S., Lobanova N. A., Kashkovsky R. V. Features of the mechanism of stress corrosion cracking of pipe metal in media containing

hydrogen sulfide and carbon dioxide// News of gas science. 2019. No. 3 (40). Pp. 60–66. [In Russ].

24. Protosenya A. G., Karasev M. A., Verbilo P. E. The prediction of elastic-plastic state of the soil mass near the tunnel with taking into account its strength anisotropy // International Journal of Civil Engineering and Technology. 2017. Vol. 8. Iss.11. P. 682–694.

25. Volokhov E. M., Kireeva V. I. Analysis of the results of field studies of geomechanical processes in construction of large transport tunnels with the use of a mechanized tunnelboring complex with work face earth pressure balance in the special conditions of voids compensation in the rock massif // ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences. 2017. Vol. 12. Iss. 20. P. 5811–5821.

26. Aginey R. V., Isupova E. V., Guskov S. S., Musonov V. V. Theoretical assessment of the corrosion rate of main pipelines caused by the influence of a geomagnetic-induced source of stray current // Science and technology in the gas industry. 2020. No. 4. Pp. 62–73. [In Russ].

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

*Гусева Н. В.*¹, канд. техн. наук, с.н.с. лаборатории геодинамической безопасности Научного центра геомеханики и проблем горного производства, Guseva_NV@pers.spmi.ru, guseva-nv@mail.ru;

*Киселев В. А.*¹, канд. техн. наук, доцент каф. маркшейдерского дела, Kiselev_VA@pers.spmi.ru, Kisselevva@mail.ru;

¹ Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, 199106, Санкт-Петербург, Васильевский остров, 21 линия д. 2, Россия.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

*Guseva N. V.*¹, Cand. Sci. (Eng.), senior researcher of the Geodynamics Laboratories of the Scientific Center for Geomechanics and Mining Problems, Guseva_NV@pers.spmi.ru, guseva-nv@mail.ru;

*Kiselev V. A.*¹, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor of the Department of mine-surveying, Kiselev_VA@pers.spmi.ru, Kisselevva@mail.ru;

¹ Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University, Russia

Получена редакцией 17.06.2024; получена после рецензии 29.07.2024; принята к печати 10.10.2024.

Received by the editors 17.06.2024; received after the review 29.07.2024; accepted for printing 10.10.2024.

