

**Н. В. Дорофеев, Е. С. Панькина, А. В. Греченева, Р. В. Романов**  
(Владимирский государственный университет им. А. Г. и Н. Г. Столетовых;  
e-mail: dorofeevvnv@yandex.ru)

## ИНФОРМАЦИОННАЯ ОБРАБОТКА ДАННЫХ ДИНАМИКИ УРОВНЯ РЕЧНЫХ ВОД ПРИ МОНИТОРИНГЕ УСТОЙЧИВОСТИ ГЕОТЕХНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

**Введение.** В ходе эксплуатации городских и сельских геотехнических систем на механические показатели устойчивости грунтового основания значительное влияние оказывает режим и динамика физико-химических свойств расположенных вблизи водоёмов, вызванная развитием карстово-суффозионных процессов. Результаты информационного анализа данных о динамике уровня речного стока и минерализации воды позволяют повысить точность прогнозных оценок потери устойчивости геотехнической системы вследствие развития карстово-суффозионных процессов.

**Цели и задачи.** Целью работы является повышение безопасности эксплуатации геотехнических систем и увеличение эффективности систем моделирования и прогнозирования геодинамики за счёт разработки алгоритма оценки изменения риска развития суффозионных процессов на основе анализа динамики уровня подземных и поверхностных вод.

**Методы.** В работе произведен анализ данных количества карстовых провалов в зависимости от динамики уровня речных вод, полученных на основе статистических источников и отчетов о режимных наблюдениях, а также в результате полевых исследований. В ходе обработки данных использован метод интерполяции сплайном, разработан алгоритм и нейронная сеть прогнозирования провалообразования с использованием метода Бейесовской регуляризации на основе сетевой обучающей функции, которая обновляет вес и смещение значения в соответствии с оптимизацией Левенберга-Марквардта.

**Результаты и их обсуждение.** По результатам практического использования была подтверждена эффективность разработанного алгоритма в выявлении динамики образования провалов в ходе информационной обработки данных изменения уровня вод в реке Ока и данных о появлении новых провалов в период с 2012 по 2019 годы. Точность моделирования в сравнении с имеющимися данными составила не менее 18,7 %.

**Заключение.** Полученные в работе результаты позволяют судить о наличии целесообразности применения разработанного алгоритма оценки возникновения карстовых провалов при мониторинге устойчивости геотехнических систем и оценке безопасности их эксплуатации в целом. Перспективы дальнейшей работы связаны с расширением набора обучающих данных и адаптацией структуры нейронной сети под индивидуальные особенности территорий за счет введения в обработку дополнительных геологических, гидрологических и климатических параметров.

**Ключевые слова:** геотехническая система, устойчивость, карстовый провал, бифуркационные параметры, информационная обработка данных.

**Для цитирования:** Дорофеев Н. В., Панькина Е. С., Греченева А. В., Романов Р. В. Информационная обработка данных динамики уровня речных вод при мониторинге устойчивости геотехнической системы // Технологии техносферной безопасности. – 2020. – Вып. 3 (89). – С. 110-120. DOI: 10.25257/TTS.2020.3.89.110-120.

## Введение

Геотехническая система является сложной многокомпонентной системой, состоящей из природных объектов и инженерно-технических сооружений, оказывающих взаимовлияние в ходе их эксплуатации. Основным показателем безопасности эксплуатации геотехнических систем является уровень устойчивости, характеризуемый совокупностью физико-механических показателей как геологических пород [1], так и конструкций инженерно-технических сооружений.

В ходе эксплуатации городских и сельских геотехнических систем на механические показатели устойчивости грунтового основания значительное влияние оказывает динамика и режим подземных рек и расположенных вблизи водоемов, приводящая к образованию полостей и провалов вследствие вымывания суффозионных пород из толщи грунтового основания.

Режим подземных вод зависит от климатических и геологических параметров [2, 3]. При анализе ландшафта на этапе планирования, строительства и эксплуатации народно-хозяйственных объектов важной задачей является оценка гидрогеологических процессов, включая оценку режима подземных вод и развитие суффозионных процессов [4, 5].

Одним из показателей развития карстово-суффозионных процессов является уровень речного стока и минерализации воды [6-8]. Результаты анализа этих данных позволяют повысить эффективность систем геоэкологического мониторинга и повысить точность прогнозных оценок развития деструктивных карстово-суффозионных процессов [9, 10].

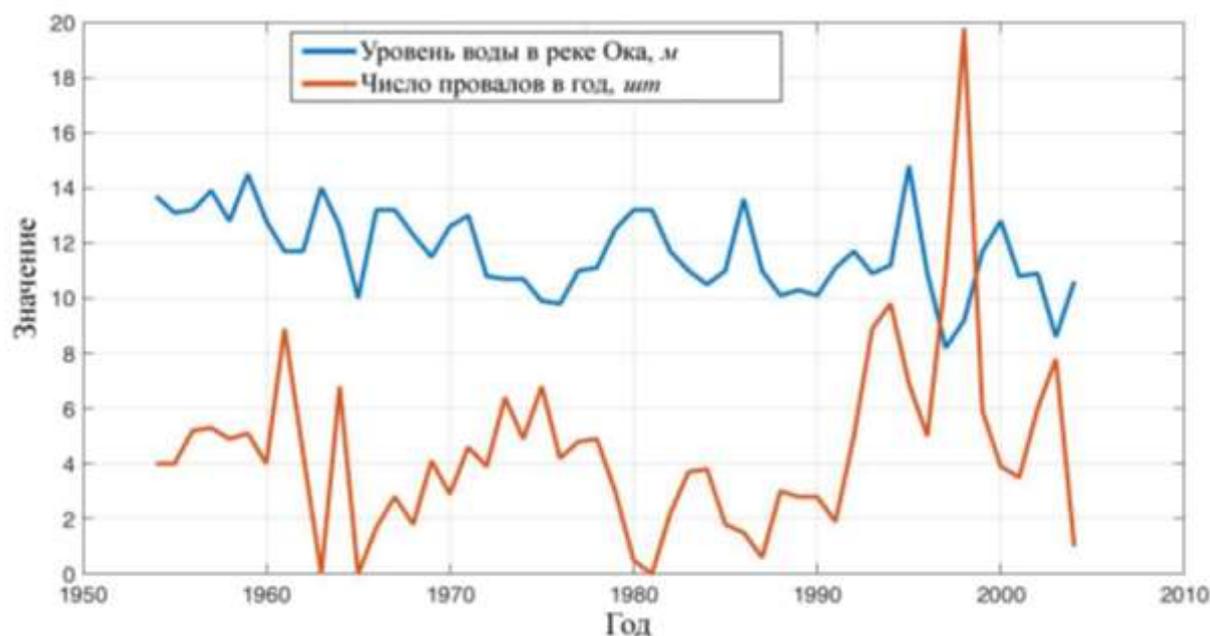
Целью работы является повышение безопасности эксплуатации геотехнических систем и увеличение эффективности систем моделирования и прогнозирования геодинамики за счёт разработки алгоритма оценки изменения риска развития суффозионных процессов на основе анализа динамики уровня подземных и поверхностных вод.

### Исходные данные гидрогеологического мониторинга

Для разработки алгоритма оценки и прогнозирования изменения уровня риска карстоопасности территории необходимо выполнить анализ данных количества провалов в зависимости от динамики уровня речных вод. На рис. 1 показаны среднегодовые изменения уровня воды в реке Ока и количество новых провалов в районе г. Дзержинск Нижегородской области за несколько лет (данные были предоставлены ЗАО "Противокарстовая защита", г. Дзержинск, в рамках сотрудничества с МИ ВлГУ<sup>1</sup>, а также получены в ходе проведения изыскательных работ сотрудниками и студентами МИ ВлГУ).

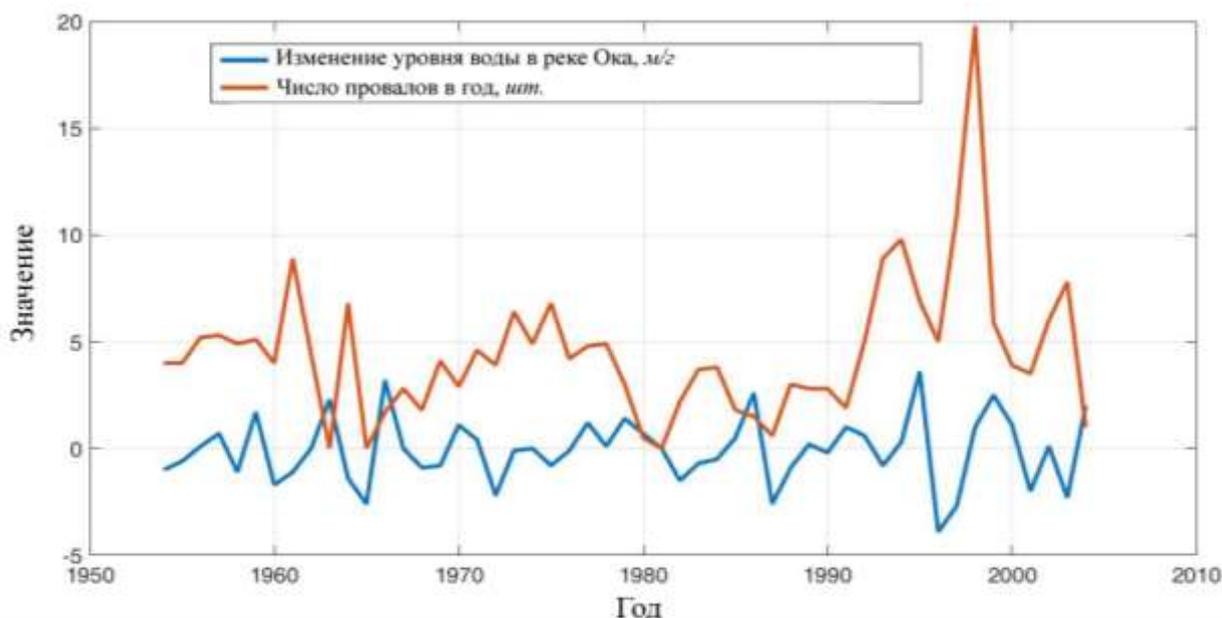
---

<sup>1</sup> Муромский институт (филиал) федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования "Владимирский государственный университет им. А. Г. и Н. Г. Столетовых"

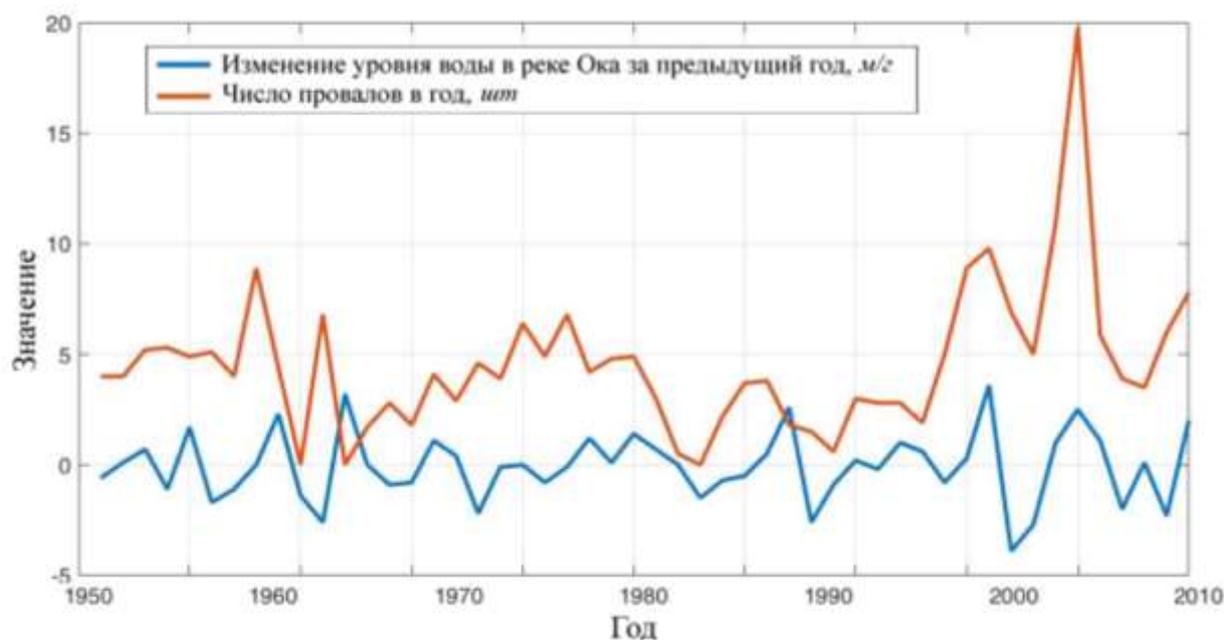


**Рис. 1.** Графики уровня воды в реке Ока и количества новых провалов

Предварительный анализ данных показывает, что появление новых провалов хорошо коррелирует с динамикой изменения уровня воды в реке (рис. 2) – разницей между уровнем воды в текущем и предыдущем году. Пики резкого уменьшения уровня воды в реке совпадают с ростом количества провалов в следующем году (рис. 3), при этом увеличение уровня воды в реке снижает появление новых провалов на следующий год. Следует отметить, что на количество образования провалов влияет не сам уровень воды, а его изменение. Наибольшее количество провалов получается после резкого повышения и последующего резкого понижения уровня воды.



**Рис. 2.** Графики изменения уровня воды в реке Ока и количества новых провалов



**Рис. 3.** Графики изменения уровня воды в реке Ока за предыдущий год и количества новых провалов в текущем году

Кроме изменения уровня воды в реке на количество образования провалов влияют геологические особенности местности. Приповерхностные гидрогеологические процессы со временем приводят к качественным изменениям местности, в результате чего изменяется зависимость образования новых провалов от изменения уровня воды. Таким образом, количество провалов в текущем году зависит от изменения уровня воды в текущем году относительно предыдущего года и динамики появления провалов за предыдущий год. Динамика появления провалов за предыдущий год (разница количества провалов за 2 предыдущих года) отражает гидрогеологические процессы за 2 предыдущих года.

Спрогнозировать точное количество провалов невозможно, поэтому в работе для прогнозирования изменения карстоопасности территории предлагается оценивать появление новых провалов по изменению динамики уровня воды и количества провалов за предыдущие периоды. Для наглядности покажем эту взаимосвязь на примере анализируемых данных.

На рис. 4 представлен результат интерполяции с помощью *Thin-plate spline*<sup>2</sup> зависимости количества новых провалов от динамики появления провалов за прошлый год и динамики изменения уровня воды в реке за текущий год. Метод *Thin-plate spline* относится к методам сеточного моделирования. В данном методе искомая поверхность, а соответственно и функция, находится как:

$$S(x, y) = a + \sum_{i=1}^n \mu_i R_i(x, y), \quad (1)$$

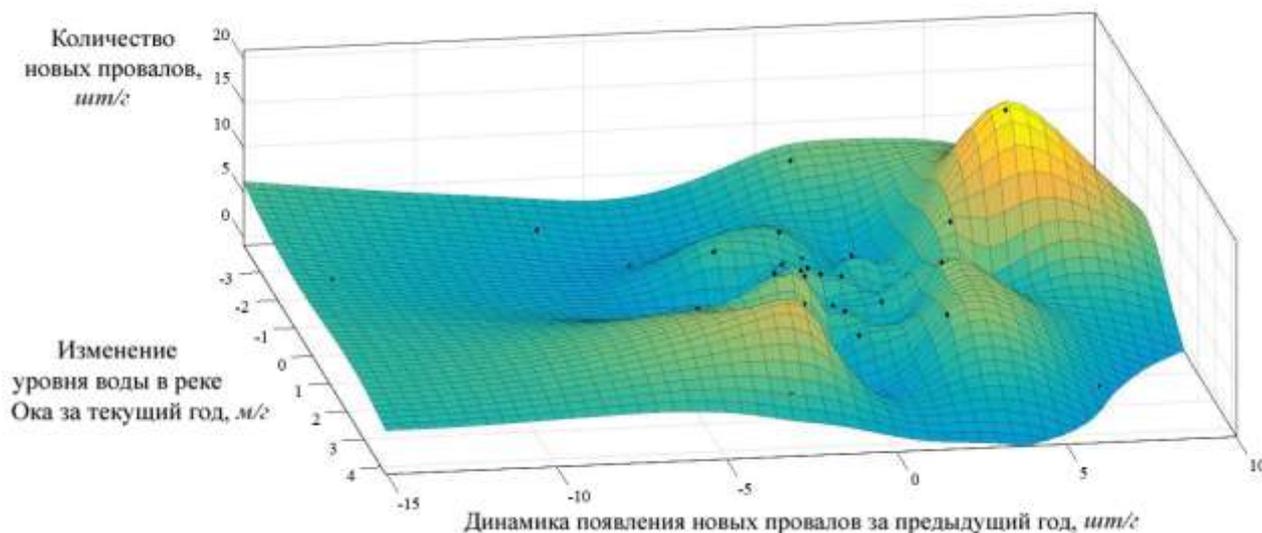
где  $a$  – константа;  $i$  – номер анализируемой точки;  $\mu_i$  – неизвестные коэффициенты;  $R_i(x, y)$  – базисная функция (2), зависящая от расстояния анализируе-

<sup>2</sup> <https://www.mathworks.com/help/curvefit/interpolation-methods.html>

мой точки до точки  $(x, y)$ .

$$R = (h^2 + r^2) \log(h^2 + r^2), \quad (2)$$

где  $h$  – интервал выбора значений;  
 $r^2$  – фактор сглаживания.



**Рис. 4.** Результаты интерполяции

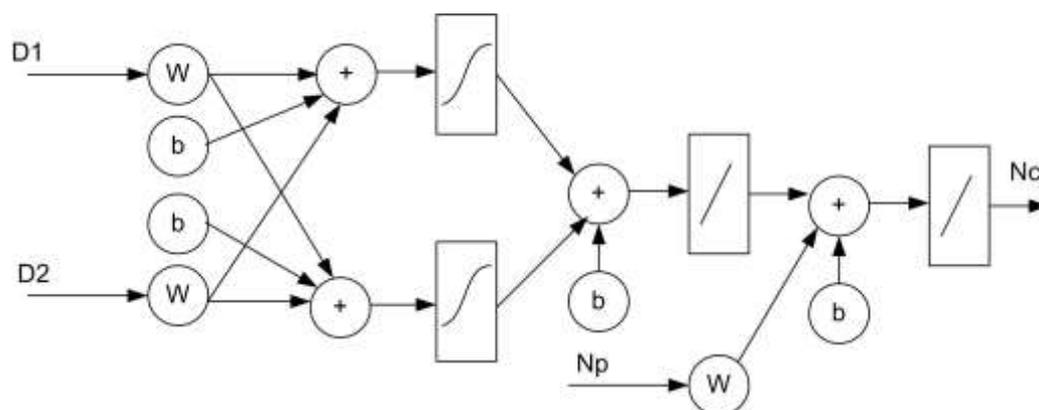
Как видно из рис. 4, перед появлением провалов происходит резкое снижение уровня воды в реке. При этом, в ходе дальнейшего снижения уровня воды в реке происходит уменьшение числа новых провалов. Точкой бифуркации при этом является переход динамики уровня воды в реке и динамики появления провалов за предыдущий год через нулевую отметку. Из графика видно, что большое количество провалов возможно при резкой смене динамики воды с положительной на отрицательную, причём количество новых провалов пропорционально скорости увеличения воды в предыдущий год и скорости уменьшения воды в текущий год.

### Информационная обработка гидрогеологических данных

На основании проведённого анализа на базе MATLAB была построена нейронная сеть для прогнозирования появления новых провалов на основе данных уровня воды в реке (рис. 5). Обучение нейронной сети происходило на основе *Bayesian Regularization*<sup>3</sup>. Вся выборка (данные с 1954 по 2004 год) разбивалась на 3 части: 70 % выборки отводилось на обучение, 15 % на коррекцию и 15 % на тестирование.

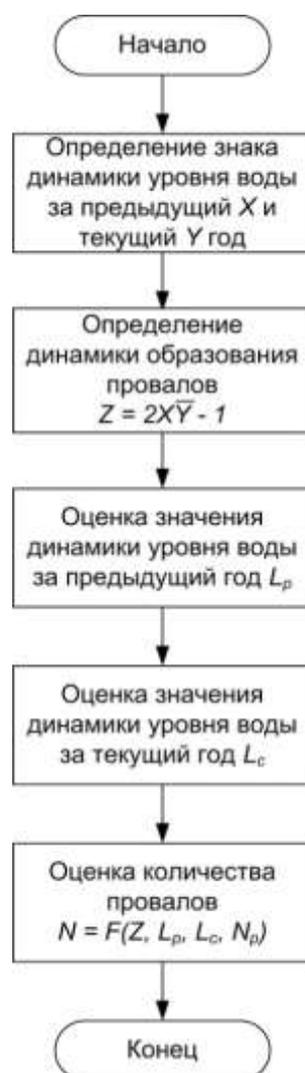
Блок-схема алгоритма оценки количества провалов приведена на рис. 6.

<sup>3</sup><https://www.mathworks.com/help/deeplearning/ref/trainbr.html>



D1 – Изменение уровня воды в реке Ока за текущий год, метр / год  
 D2 – Изменение уровня воды в реке Ока за предыдущий год, метр / год  
 Np – Изменение количества новых провалов за предыдущий год  
 Nc – Изменение количества новых провалов за текущий год

**Рис. 5.** Структура нейронной сети оценки динамики провалов



**Рис. 6.** Блок-схема алгоритма оценки количества провалов

## Результаты и обсуждение

Практическая проверка разработанного алгоритма была проведена на основе информационной обработки данных (рис. 7) изменения уровня вод в реке Ока и данных о появлении новых провалов в период с 2012 по 2019 годы (данные были предоставлены ЗАО "Противокарстовая защита", г. Дзержинск Нижегородской области, в рамках сотрудничества с МИ ВлГУ, а так же получены в ходе проведения изыскательных работ сотрудниками и студентами МИ ВлГУ).

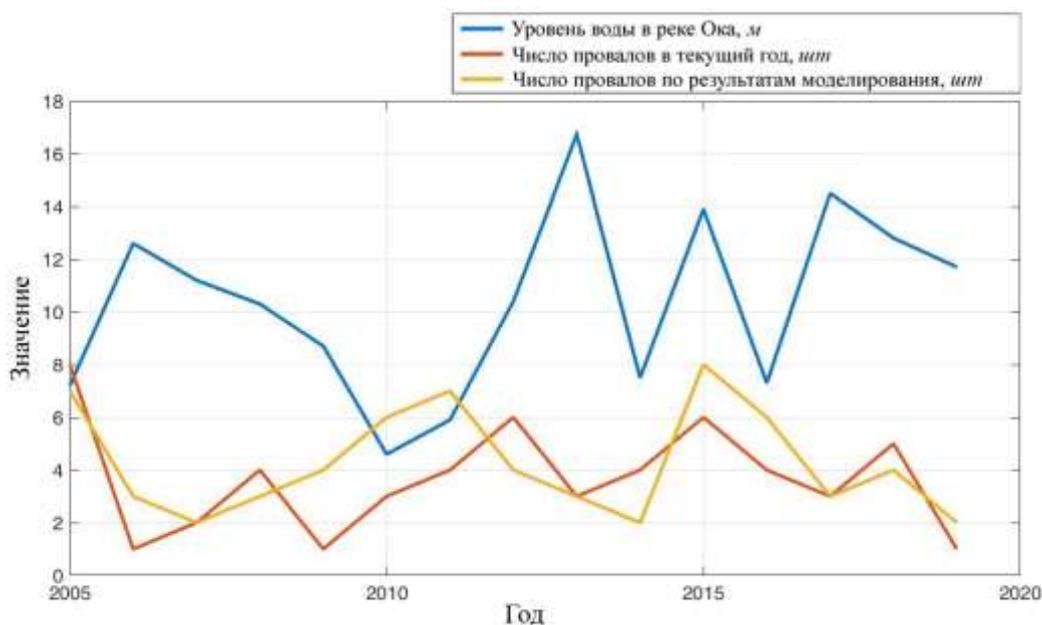


Рис. 7. Сравнение результатов моделирования и прямых наблюдений

Как видно из рис. 7, разработанный алгоритм позволяет выявлять динамику образования провалов. Точность моделирования в сравнении с имеющимися данными составляет не менее 18,7 %.

## Заключение

На основании полученных в работе результатов можно судить об имеющейся целесообразности применения разработанного алгоритма оценки возникновения карстовых провалов при мониторинге устойчивости геотехнических систем и оценке безопасности их эксплуатации в целом. Также разработанный алгоритм позволит дополнить методологическую базу систем прогнозирования распространения (вымывания из почвы, накапливания, переноса) загрязняющих веществ и изменения уровня минерализации подземных и поверхностных вод, используемых в народно-хозяйственной деятельности.

Следует отметить, что из-за небольшого набора обучаемой выборки точность разработанного алгоритма может существенно отличаться от указанной выше при анализе нового набора данных, а также данных по другим территориям. Данный недостаток может быть частично устранён за счёт переобучения нейронной сети на расширенном наборе данных, либо адаптации структуры нейронной сети под индивидуальные особенности территории за счёт введения в обработку дополнительных параметров (геологических, гидрологических, климатических).

*Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Президента Российской Федерации № МД-1800.2020.8*

#### Литература

1. Минаев В. А., Фаддеев А. О., Ахметишин Т. Р., Невдах Т. М. Методика оценки динамики опасных геодинамических процессов в литосфере на базе нечётких моделей // Технологии техносферной безопасности. Вып. 1 (83). 2019. С. 126-138. <https://doi.org/10.25257/TTS.2019.1.83.126-138>.
2. Бочевер Ф., Гармонов В., Лебедев А., Шестаков В. Основы гидрогеологических расчётов. М.: Недра, 1965. 307 с.
3. Шестаков В., Невечера И., Авиллина И. Методы оценки ресурсов подземных вод в районах водозаборов прибрежных районов. М.: КДУ, 2009, 192 с.
4. Romanov R. V., Kuzichkin O. R., Dorofeev N. V., Grecheneva A. V. The assessment of the influence of the hydrogeological regime of rivers on the conditions of the decentralized water supply in karst areas // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2020, 459 (4), art. no. 042086 <https://doi.org/10.1088/1755-1315/459/4/042086>.
5. Kuzichkin O. R., Romanov R. V., Dorofeev N. V., Grecheneva A. V. Organization and application of information and analytical support for geological monitoring of water use // IOAB Journal. 2020. Vol. 11 (1). Pp. 20-26.
6. Печеркин А. А. Геодинамика сульфатного карста 1986 года. Иркутск: изд-во Иркут. ун-та, 1986. 169 с.
7. Grecheneva A. V., Kuzichkin O. R., Romanov R. V., Bykov A. A. Analysis of influence of endogenous factors on results of geocological express-control of water resources // Jour. of Eng. and Appl. Science. 2017. № 12 (24). Pp. 6852-6857.
8. Дублянский В., Кикнадзе Т. Гидрогеология карста альпийской складчатой области СССР. М.: Наука, 1984. 128 с.
9. Токарев С. В. Оценка уязвимости карстовых подземных вод к загрязнению на примере массива Ай-Петри, горный Крым // Вопросы географии. 2018. № 147. С. 143-160.
10. Климчук А. Б., Токарев С. В. Рекомендации по охране подземных источников питьевого водоснабжения в карстовых регионах // Спелеология и карстология. 2014. № 12. С. 5-16.

*Материал поступил в редакцию 23 июля 2020 г.; принят к публикации 29 сентября 2020 г.*

*N. V. Dorofeev, E. S. Pankina, A. V. Grecheneva, R. V. Romanov*  
(Vladimir State University named after A. G. and N. G. Stoletovs;  
e-mail: dorofeev@yandex.ru)

## INFORMATION PROCESSING OF RIVER WATER LEVEL DYNAMICS DURING MONITORING OF GEOTECHNICAL SYSTEM STABILITY

**Introduction.** During the operation of urban and rural geotechnical systems, the mechanical indicators of the stability of the soil base are significantly influenced by the regime and dynamics of the physicochemical properties of nearby water bodies, caused by the development of karst-suffusion processes. The results of information analysis of data on the dynamics of the river runoff level and water salinity make it possible to increase the accuracy of predictive estimates of the loss of stability of the geotechnical system due to the development of karst-suffusion processes.

**Goals and objectives.** The aim of the work is to improve the safety of operation of geotechnical systems and increase the efficiency of modeling and forecasting systems for geodynamics by developing an algorithm for assessing changes in the risk of developing suffusion processes based on an analysis of the dynamics of the level of groundwater and surface waters.

**Methods.** The paper analyzes the data on the number of karst sinkholes depending on the dynamics of the river water level, obtained on the basis of statistical sources and reports on regime observations, as well as a result of field research. In the course of data processing, a spline interpolation method was used, an algorithm and a neural network for predicting a failure using the Bayesian regularization method based on a network training function was developed, which updates the weight and bias of the value in accordance with the Levenberg-Marquardt optimization.

**Results and its discussion.** Based on the results of practical use, the effectiveness of the developed algorithm was confirmed in identifying the dynamics of the formation of dips during information processing of data on changes in the water level in the Oka River and data on the appearance of new dips in the period from 2012 to 2019.

**Conclusion.** The results obtained in the work make it possible to judge the presence of the expediency of using the developed algorithm for assessing the occurrence of karst sinkholes when monitoring the stability of geotechnical systems and assessing the safety of their operation in general. Prospects for further work are associated with expanding the set of training data and adapting the structure of the neural network to the individual characteristics of the territories by introducing additional geological, hydrological and climatic parameters into the processing.

**Key words:** geotechnical system, stability, karst sinkhole, bifurcation parameters, information processing of data.

**For citation:** Dorofeev N. V., Pankina E. S., Grecheneva A. V., Romanov R. V. Information processing of river water level dynamics during monitoring of geotechnical system stability. *Tekhnologii tekhnosfernoj bezopasnosti / Technology of technosphere safety*, 2020, vol. 3 (89), pp. 110-120 (in Russian). DOI: 10.25257/TTS.2020.3.89.110-120.

### Reference

1. Minaev V. A., Faddeev A. O., Akhmetshin T. R., Nevdakh T. M. Method of assessment dangerous geodeformation processes dynamics in the lithosphere on the basis of fuzzy models. *Tekhnologii tekhnosfernoj bezopasnosti / Technology of technosphere safety*, vol. 1 (83), 2019, pp. 126-138 (in Russian). <https://doi.org/10.25257/TTS.2019.1.83.126-138>
2. Bochever F., Garmonov V., Lebedev A., Shestakov V. *Osnovy gidrogeologicheskikh raschetov* [Fundamentals of hydrogeological calculations]. Moscow, Nedra Publ., 1965, 307 p.
3. Shestakov V., Nevechera I., Avilina I. *Metody otsenki resursov podzemnykh vod v rayonakh vodozaborov pribrezhnykh rayonov* [Methods for assessing groundwater resources in the water intake areas of coastal areas]. Moscow, KDU Publ., 2009, 192 p.
4. Romanov R. V., Kuzichkin O. R., Dorofeev N. V., Grecheneva A. V. The assessment of the influence of the hydrogeological regime of rivers on the conditions of the decentralized water supply in karst areas. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2020, 459 (4), art. no. 042086. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/459/4/042086>.
5. Kuzichkin O. R., Romanov R. V., Dorofeev N. V., Grecheneva A. V. Organization and application of information and analytical support for geological monitoring of water use. *IIOAB Journal*, 2020, vol. 11 (1), pp. 20-26.
6. Pecherkin A. A. *Geodinamika sul'fatnogo karsta 1986 goda* [Geodynamics of sulfate karst in 1986]. Irkutsk, Irkutsk State University Publ., 1986, 169 p.
7. Grecheneva A. V., Kuzichkin O. R., Romanov R. V., Bykov A. A. Analysis of influence of endogenous factors on results of geocological express-control of water resources. *Jour. of Eng. and Appl. Science*, 2017, no. 12 (24), pp. 6852-6857.
8. Dublyansky V., Kiknadze T. *Gidrogeologiya karsta al'piyskoy skladchatoy oblasti SSSR* [Hydrogeology of karst in the Alpine folded region of the USSR]. Moscow, Nauka Publ., 1984, 128 p.
9. Tokarev S. V. The assessment of karst groundwater vulnerability to contamination on the example of Ay-Petri massif, Mountainous Crimea. *Voprosy geografii / Questions of geography*, 2018, no. 147, pp. 143-60 (in Russian).
10. Klimchouk A. B., Tokarev S. V. Recommendations on groundwater source protection for drinking water supply in karst regions. *Speleologiya i karstologiya / Speleology and Karstology*, 2014, no. 12, pp. 5-16 (in Russian).

Received July 23, 2020; accepted September 29, 2020

## Информация об авторах

ДОРОФЕЕВ Николай Викторович  
д-р техн. наук, доцент; заведующий кафедрой "Управление и контроль в технических системах"; Владимирский государственный университет им. А. Г. и Н. Г. Столетовых, Муромский институт (филиал); Российская Федерация, г. Муром, ул. Орловская, д. 23; ORCID ID: 0000-0002-1636-7654, РИНЦ Author ID: 232176; e-mail: dorofeevvn@yandex.ru

ПАНЬКИНА Екатерина Сергеевна  
научный сотрудник кафедры "Управление и контроль в технических системах"; Владимирский государственный университет им. А. Г. и Н. Г. Столетовых, Муромский институт (филиал); Российская Федерация, г. Муром, ул. Орловская, д. 23; ORCID ID: 0000-0001-8891-9529, РИНЦ Author ID: 1080028; e-mail: pankina@bsu.edu.ru

ГРЕЧЕНЕВА Анастасия Владимировна  
канд. техн. наук; доцент кафедры "Управление и контроль в технических системах"; Владимирский государственный университет им. А. Г. и Н. Г. Столетовых, Муромский институт (филиал); Российская Федерация, г. Муром, ул. Орловская, д. 23; ORCID ID: 0000-0002-7341-5237, РИНЦ Author ID: 821738; e-mail: grechenevaav@yandex.ru

РОМАНОВ Роман Вячеславович  
канд. техн. наук; доцент кафедры "Управление и контроль в технических системах"; Владимирский государственный университет им. А. Г. и Н. Г. Столетовых, Муромский институт (филиал); Российская Федерация, г. Муром, ул. Орловская, д. 23; ORCID ID: 0000-0003-2280-3771, РИНЦ Author ID: 738526; e-mail: romanov.roman.5@yandex.ru

## Information about the authors

DOROFEEV Nikolay Viktorovich  
Doctor of Technical Sciences, Associate Professor; Head of the Department "Management and control in technical systems"; Vladimir State University named after Alexander Grigoryevich and Nickolay Grigoryevich Stoletovs, Murom Institute (Branch); Russian Federation, Murom, Orlovskaya St., 23; ORCID ID: 0000-0002-1636-7654, RSCI Author ID: 232176; e-mail: dorofeevvn@yandex.ru

PANKINA Ekaterina Sergeevna  
Research Associate of the Department "Management and control in technical systems"; Vladimir State University named after Alexander Grigoryevich and Nickolay Grigoryevich Stoletovs, Murom Institute (Branch); Russian Federation, Murom, Orlovskaya St., 23; ORCID ID: 0000-0001-8891-9529, RSCI Author ID: 1080028; e-mail: pankina@bsu.edu.ru

GRECHENEVA Anastasiya Vladimirovna  
Candidate of Technical Sciences; Associate Professor of Department "Management and control in technical systems"; Vladimir State University named after Alexander Grigoryevich and Nickolay Grigoryevich Stoletovs, Murom Institute (Branch); Russian Federation, Murom, Orlovskaya St., 23; ORCID ID: 0000-0002-7341-5237, RSCI Author ID: 821738; e-mail: GrechenevaAV@yandex.ru

ROMANOV Roman Vyacheslavovich  
Candidate of Technical Sciences; Associate Professor of Department "Management and control in technical systems"; Vladimir State University named after Alexander Grigoryevich and Nickolay Grigoryevich Stoletovs, Murom Institute (Branch); Russian Federation, Murom, Orlovskaya St., 23; ORCID ID: 0000-0003-2280-3771, RSCI Author ID: 821738; e-mail: GrechenevaAV@yandex.ru