

17. Trejer V. V., Elizarov A. B. *Jelektrohimičeskie integrirujuščie i analogovye zapominajuščie jelementy*. M.: Jenergija, 1973.
18. Galushkin A. I. *Nejrokomп'jutyry*. Kn. 1. Seriya "Nejrokomп'jutyry i ih primenenie". M.: IPRJR, 2000.
19. *Nejrokomп'jutyry: ot programmnoj k apparatnoj realizacii*. M.: Gorjachaja linija — Telekom, 2006.
20. Shin S., Kim K., Kang S. M. Memristors and Their Applications for Nanocomputing. *IEEE Trans. on Nanotechnology*, Mar. 2011.
21. Manem H., Rajendran J., Garrett S. Rose Stochastic Gradient Descent Inspired Training Technique for a CMOS / Nano Memristive Trainable Threshold Gate Array. *IEEE Transactions on circuits and systems — I: regular papers*. May 2012. V. 59, N. 5.
22. Adhikari S. P., Yang C., Kim H. Memristor Bridge Synapse-Based Neural Network and Its Learning. *IEEE Transactions on neural networks and learning systems*. 2012. V. 23, N. 9.
23. Maheshwar Pd. Sah, Changju Yang, Hyongsuk Kim and Leon O Chua. Meristor Circuit for Artificial Synaptic Weighting of Pulse Inputs. *Circuits and Systems (ISCAS)*, 2012, IEEE International Symposium.
24. Maheshwar Pd. Sah, Changju Yang, Ram Kaji Budhathoki, Hyongsuk Kim. Features of memristor emulator-based artificial neural synapses. *Circuits and Systems (ISCAS)*, 2012 IEEE International Symposium.
25. Young-Su Kim, Kyeong-Sik Min. Synaptic weighting circuits for Cellular Neural Networks. *Cellular Nanoscale Networks and Their Applications (CNNA)*, 2012 13th International Workshop.
26. Walls T. J., Likharev K. K. Self-Organization in Autonomous, Recurrent, Firing-Rate CrossNets With Quasi-Hebbian Plasticity. *IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems*. 2014. V. 25, N. 4.
27. Hebb D. O. *The organization of Behavior: A Neuropsychological Theory*. New York: Wiley, June 1949.
28. Gorchetchnikov A., Versace M., Ames H., Chandler B., Leveille J., Livitz G., Mingolla E., Snider G., Amerson R., Carter P., Abdalla H., Qureshi M. S. Review and unification of learning framework in Cog Ex Machina platform for memristive neuromorphic hardware // *Proc. of International Joint Conference on Neural Networks*. San Jose, California, USA, July 31—August 5, 2011.
29. Jae-sun Seo et al. A 45 nm CMOS neuromorphic chip with a scalable architecture for learning in networks of spiking neurons. *IEEE. Custom Integrated Circuits Conference (CICC)*, 2011.
30. Serrano-Gotarredona T., Prodromakis T., Linares-Barranco B. A Proposal for Hybrid Memristor-CMOS Spiking Neuromorphic Learning Systems. *IEEE Circuits and Systems Magazine*. V. 13, Is. 2.
31. Yongtae Kim, Yong Zhang, Peng Li. A digital neuromorphic VLSI architecture with memristor crossbar synaptic array for machine learning. *IEEE International SOC Conference (SOCC)*, 2012.
32. Azghadi M. R., Moradi S., Indiveri G. Programmable neuromorphic circuits for spike-based neural dynamics. *IEEE 11th International New Circuits and Systems Conference (NEWCAS)*, 2013.
33. Kaneko Y., Nishitani Yu., Ueda M., Tsujimura A. Neural network based on a three-terminal ferroelectric memristor to enable on-chip pattern recognition. *Symposium VLSI Technology rVLSIT*. 2013.
34. Galushkin A. I., Simorov S. N. *Nejrosetevye tehnologii v Rossii (1982—2010 g.)*. M.: Gorjachaja linija — Telekom, M. 2011.

УДК 519.856.2

**В. В. Федосов**, канд. техн. наук, доц., г. Москва, e-mail: vlr.fdsv@gmail.com,  
**А. В. Федосова**, канд. физ.-мат. наук,  
 Национальный университет, Богота, Колумбия  
 (Universidad Nacional de Colombia, e-mail: afedosova@unal.edu.co)

## Использование нейросетей для графической оценки загрязнения территории выбросами группы источников

*Взамен математического описания выбросов загрязнений источниками предложено использовать нейрофункции, генерируемые по данным рисованных контурных графиков облаков выбросов.*

*Нейрофункции эффективно выводят графику выборочного или общего загрязнения территории и пригодны для дальнейших расчетов или оптимизации.*

**Ключевые слова:** источники промышленных выбросов, облака выбросов, загрязнение территории, контурные графики, нейронные сети, фильтрация выбросов

### Введение

Промышленная экология рассматривает загрязнения территории или среды источниками вредных выбросов (например промпредприятиями) как сложные системы, содержащие параметры источников (мощности, размещение, дальность разброса), выбросов (типы, масса и размеры частиц, наборы компонентов или состав), среды (ветер, влажность, температура), динамику и пр. Выбросы в значительной степени формируются за счет пылевых, капельных или газовых частиц. Несмотря на обширные базы данных и трудоемкость создания таких систем, конечные результаты расчетов загрязнений территорий следует признать только оценочными.

При моделировании ключевым является функциональное описание выбросов источниками. Его концепция, математический аппарат, введение усложнений (упрощений) определяются целями задачи и квалификацией исследователя.

Последующие расчеты облаков выбросов ведут к построению соответствующих карт загрязнения, обсуждению адекватности моделирования и практической ценности результатов. Такой подход достаточно апробирован и ценен уже тем, что выявляет неясные заранее наложения загрязнений выбросами группы источников. Он применим как для прямых, так и для оптимизационных расчетов загрязнений.

Между тем авторская математика часто субъективна, достаточно трудоемка и ограничена в вариативности описания облаков выбросов. Формулы содержат значительное число условных коэффициентов. При наличии в модели множества источников выбросов их работа описывается единообразно, хотя на практике облака даже близко расположенных

источников нередко формируются по-разному. Формульные модели, как правило, чувствительны к малейшим изменениям входной информационной базы, но их трудно интерпретировать в результатах. Принятый в модели математический аппарат сложно корректировать, так как он уже "прошит" в программировании. Результаты работы моделей с разными математическими подходами трудно сопоставимы.

Противоречие состоит в том, что от такой аналитики хотелось бы уйти, но наличие функционального описания выбросов для моделирования остается необходимым.

В работе ставились следующие задачи:

- формировать облака выбросов без математических формул;
- входную базу данных связывать не с источниками, а сразу с облаками выбросов;
- напрямую встраивать в облака данные мониторинга или прогноза загрязнений;
- сохранить возможность получения функционального описания облаков выбросов.

Такие возможности открывает использование нейросетей. Современные системы (например, MATLAB) имеют полный набор процедур проектирования, обучения и генерирования нейросетей. Главные достоинства использования нейросетей в данной работе следующие:

- отмена авторской математики;
- значительное упрощение входной базы данных модели;
- работа напрямую с облаками выбросов;
- автоматическое получение функционального описания выбросов.

На рис. 1 приведена схема реформирования традиционного аналитического подхода.



Рис. 1. Схема применения аналитических и нейрофункций в описании выбросов

Концептуально обе ветви содержат по одному авторскому элементу, следовательно, предположительное качество моделирования сопоставимо. В то же время второй подход менее трудоемок (напрямую рисовать облака легче, чем описывать их формулами), более свободен для моделирования и менее требователен к квалификации исследователя. Важно также, что подготовка данных к расчетам в какой-то мере становится типовой.

В работе показана возможность отображения облаков выбросов нейрофункциями и на их основе построения карт загрязнения территории. Проектирование нейрофункций и представление загрязнений в графике вели в MATLAB.

### Алгоритм и численные эксперименты

В основе алгоритма лежит способ представления облака разброса загрязнений источником в пределах территории непосредственно в графике и дальнейшей генерации нейрофункций на основе созданной графики.

В картографии для плоского изображения рельефных поверхностей широко применяют контурные графики, на которых каждый из контуров (линий) связывается с определенным значением высоты. Контурные графики могут быть полностью замкнутыми в пределах территории либо обрываться на какой-то из границ. Создание контурного графика является быстрой и элементарной процедурой.

Если контурные графики изобразить в цвете (связать цвет контура со значением предполагаемой функции загрязнения), то попиксельное считывание такого многоконтурного рисунка образует массив координат точек территории с переменным значением функции. Последовательность размещения точек в массиве значения не имеет. На основе данных этого массива возможно проектирование и обучение нейрофункций. В принципе, нейрофункции являются аналогами процедур аппроксимации, однако последние организуют дискретное представление результатов, в то время как, например, для задач полубесконечной оптимизации загрязнений [1, 2] требуется непрерывное представление. В качестве функции нейросетей уже обеспечивает бесконечный набор координат точек территории.

Проектирование, обучение и тестирование нейронных сетей описывали в терминах *Neural Networks Tools* MATLAB [3]. Вариантом архитектуры выбрана четырехслойная полносвязная сеть с числом нейронов слоев [2-6(8)-4(6)-1], функция создания сети "newff", передаточные функции "logsig", "purelin", обучающий алгоритм "trainlm".

При обработке массивов точек контуров наиболее удачно генерации нейросетей протекали при понижении исходного параметра "Performance" примерно на два порядка. Генерации нейрофункций требовали неопределенного числа пусков (в работе оно составило 3—8).

Прямое создание облаков выбросов требует иной информационной базы. Если, например, аналитическое описание выбросов относительно несложными параболическими функциями требует указания мощности источника, его координат, коэффициента дальности разброса, указания силы и направления ветра [2], то взамен этого для генерации нейрофункций достаточен только вектор значений загрязнения на контурах. Такая "экономия" достигается по каждому источнику или компоненту выбросов, если их состав сложный. Непосредственные координаты источников перестают быть аргументом выбросов, так как источник отождествляется сразу с облаком его выбросов. Хотя косвенно предположить место расположения источника в облаке можно, если иметь карту линий тока ветра данной территории.

Одному облаку можно ставить в соответствие выбросы двух, более и даже всех источников. Правда, последнее мало приемлемо, так как "рисованная" карта загрязнения территории всеми источниками является, по существу, решением задачи. При сложном составе выбросов облако можно ассоциировать с одним компонентом, с выборкой компонентов либо суммой всех компонентов.

Расчет суммарного загрязнения в точках  $s(X, Y)$  территории ( $T$ ) вели по формуле

$$z(s_T) = \sum_{j=1}^N Ft(j) \times \text{sim}(\text{net}(j, s_T)), \quad (1)$$

где  $z(j, s_T)$  — значения нейрофункций  $\text{net}(j, s_T)$  на сетке территории  $s_T$ ;  $j$  — номер источника;  $\text{sim}()$  — функция, моделирующая работу нейросетей;  $Ft(j)$  — коэффициент фильтрации выбросов  $j$  источника [0...1];  $N$  — число источников выбросов.

С помощью облаков представили воздействие на территорию 24 источников выбросов. Размеры территории  $d$  [600 × 300]. Рисованным контурам облаков ставили в соответствие три вектора условных значений выбросов:  $\mathbf{v1}$  [10, 30, 50, 60, 70];  $\mathbf{v2}$  [80, 120, 160, 200, 230],  $\mathbf{v3}$  [140, 210, 270, 350, 420]. По выбросам каждого источника генерировали нейрофункцию.

### Сравнительная графика

На рис. 2—4 приведена графика облаков выбросов источников ( $N = 24$ ) по результатам работы (выходов) обученных нейронных сетей. Облака представлены дискретной графикой, однако непрерывность нейрофункций позволяет объявить требуемую дискретность уровней вывода графики.

Облака разброса имели разный характер (с выраженной асимметрией, с подразумеваемым разным ветровым смещением, много- или унимодальными экстремумами).

Описать такое многообразие выбросов аналитически было бы проблемным. Генерация нейрофункций всех источников открывает далее возможность многих комбинаций представления карт загрязнения территории: суммарные общие, суммарные по выборкам, суммарные по компонентам выбросов и т. д.

На рис. 5 (см. четвертую сторону обложки) показана карта загрязнения территории выборкой 1 источников (2, 4, 6, 7, 9, 13—15, 18, 21, 24) при  $Fr() = 1$  (фильтрация выбросов отсутствует). Загрязнения характеризуются двумя значительными возвышениями в юго-западной и одним локальным в центральной частях территории. Расположенность облака может предполагать концентрацию размещения группы 1 источников на юго-западной части и отсутствие ветровых смещений. Если ветровые смещения имели место, то предполагается: а) юго-западное размещение источников при умеренном также юго-западном ветровом смещении; б) северо-восточное и восточное размещение источников при значи-

тельном северо-восточном смещении. Полностью свободен от загрязнения небольшой (~5 %) участок в северо-западной части территории.

На рис. 6 (см. четвертую сторону обложки) показана карта загрязнения территории выборкой 2 источников (1, 3, 5, 8, 10, 11, 12, 16, 17, 19, 20, 22, 23) при  $Fr() = 1$ . Эпицентром загрязнения является значительное пятно в центральной части. Если предположить отсутствие или крайне слабые северо-восточные ветровые смещения, то мощности источников группируются именно в центральной части. Подобная карта также не исключает группировки источников в юго-западной части при наличии сильных смещений в сторону центра.

На рис. 7 (см. четвертую сторону обложки) показана карта общего загрязнения территории всеми источниками при  $Fr() = 1$ . Выявлены координаты центрального пятна загрязнений с уровнем  $\geq 1550$  у. е., от которого на юго-запад уходит шлейф с уровнем  $\geq 1300$  у. е. Оцифрованные склоны характеризуют падение загрязнения в направлениях границ территории.

Как известно, фильтрация выбросов остается эффективным средством понижения загрязняющей нагрузки территории. Если считать, что выбросы источников подвергаются фильтрации, то карты загрязнения меняются: в большей степени за счет интенсивностей выбросов, в меньшей — по конфигурациям облаков.

На рис. 8 (см. четвертую сторону обложки) показана карта загрязнения выборкой 1 источников при объявленном векторе фильтрации.

Фильтрация существенно ослабила загрязняющую нагрузку территории. Значение загрязнений в максимумах понизилось от ~1000 до ~300. В целом конфигурация общего облака сохранена. Характер распределения загрязнений практически выровнен. Общий усредненный коэффициент фильтрации составил 0,459. Фильтрация выборки 1 источников внесет корректив в общую карту загрязнения территории всеми источниками.

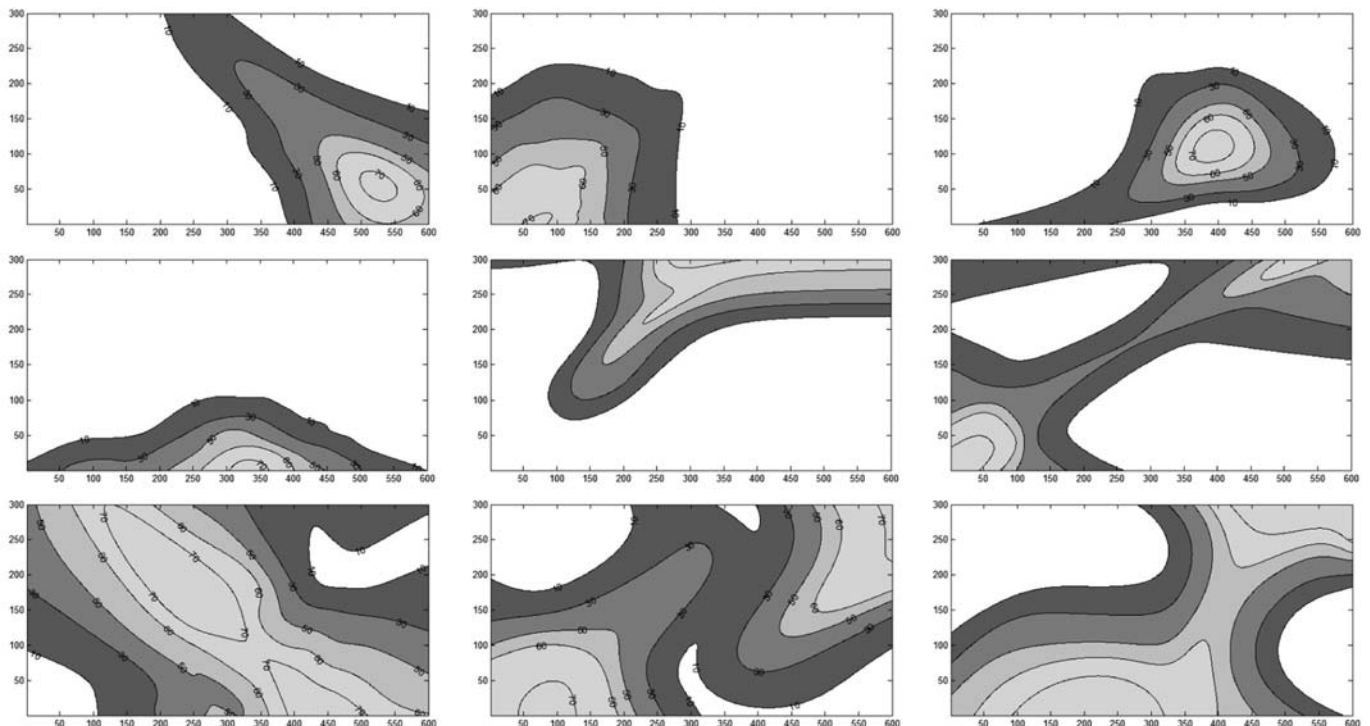


Рис. 2. Карты облаков выбросов источников 1—9

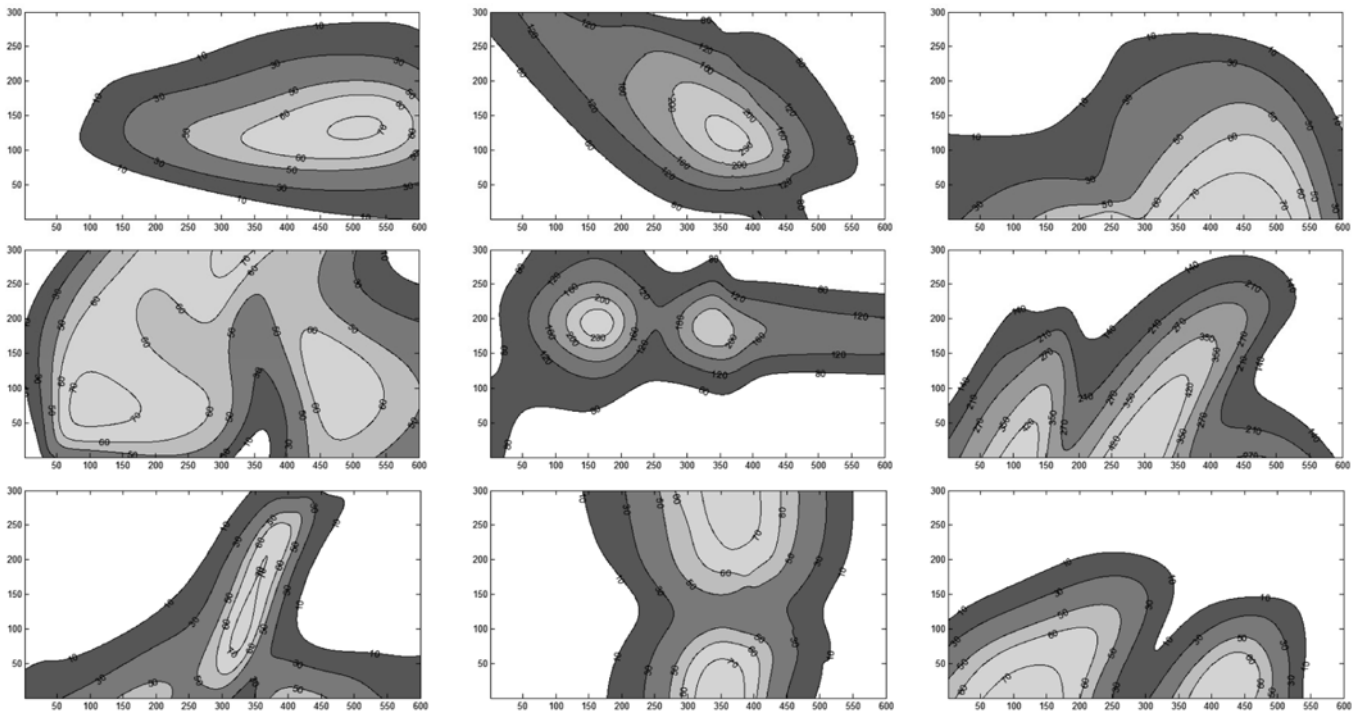


Рис. 3. Карты облаков выбросов источников 10–18

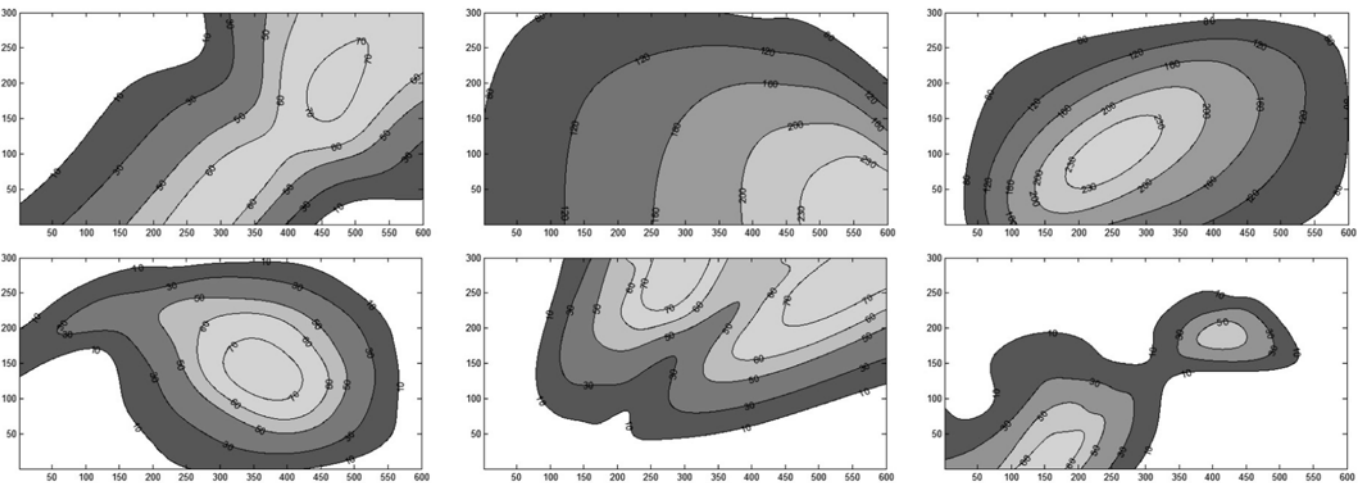


Рис. 4. Карты облаков выбросов источников 19–24

В приведенных примерах размеры изображений облаков выбросов источников совпадали с размерами территории. Естественно, это не обязательно. Если рассматривается превышающая по размерам территория, то перед суммированием облака отдельных источников можно относительно перемещать, вращать, делать частичные наложения и пр.

Полученные нейрофункции облаков выбросов позволяют в дальнейшем формировать многие критерии и оценки загрязнения частей или всей территории, имеющие различный технико-экономический смысл. На их основе могут проектироваться целевые функции или ограничения для задач оптимизации (линейное или нелинейное программирование).

Нейрофункции эффективны при описании простых, сложных и нестандартных облаков выбросов отдельных источников или групп. Уже то, что контурные графики будущих

нейрофункций легко и бесконечно редактируемы, может стать решающим преимуществом перехода на нейрофункции.

Применение нейрофункций существенно дополняет аналитический подход новыми возможностями, совершенствующими моделирование в сложной области — расчета, оптимизации и визуализации разбросов загрязнений промышленными источниками.

### Заключение

Введение нейрофункций взамен математического описания выбросов загрязнений источниками значительно сокращает входящую информационную базу моделирования, допускает прямое использование мониторинга или прогноза загрязнений и в целом упрощает графическое отображение облаков выбросов.

Нейрофункции эффективно выводят графику выборочного или общего загрязнения территории, позволяют учитывать необходимые дополнительные параметры (например переменную фильтрацию) выбросов источников и пригодны для прямых или оптимизационных расчетов загрязнений.

#### Список литературы

1. Федосов В. В., Федосова А. В. Полубесконечная модель фильтров многокомпонентных выбросов для группы промыш-

ленных источников территории // Безопасность жизнедеятельности. 2013. № 2. С. 42–46.

2. Федосов В. В., Федосова А. В. Моделирование контроля и ограничения промышленных выбросов при наличии ветровых смещений // Вестник компьютерных и информационных технологий. 2011. № 9. С. 29–35.

3. Дьяконов В. П., Круглов В. В. MATLAB 6.5 SP1/7/7 SP1/7 SP2 + Simulink 5/6. Инструменты искусственного интеллекта и биоинформатики. М.: СОЛОН-ПРЕСС, 2006. 456 с.

V. V. Fedosov, Associate Professor, e-mail: vlr.fdsv@gmail.com, A. V. Fedosova, Universidad Nacional de Colombia, e-mail: afedosova@unal.edu.co

## The Use of Neural Functions for Graphical Evaluation Contamination Emissions Group Sources

*Under the control of pollution of the territory, region or environment as a result of emissions from industrial sources, distributed monitoring, forecasts or estimates. Monitoring is necessary to spend, but few informative for understanding the relationship and management of complex systems. Projections should be based on a representative database, but the results are only probabilistic nature. Calculations pollution as complex systems that take into account a large number of variables that are to manage the impact on one or more of the evaluation criteria.*

*In the simulation of industrial ecology is a key functional description of the emission sources. His concept of the mathematical apparatus, the introduction of complications (simplifications) determined by the objectives and tasks of the qualifications of the investigator. However, authoring mathematics is often subjective, is quite laborious and limited variability describe clouds emissions. Need a tool cloud formation emissions without mathematical formulas, but lets you embed cloud monitoring data and forecast pollution.*

*Such opportunities opened by the use of neural networks. This results in: the abolition of the author of mathematics; considerable simplification of the input database model; work directly with clouds emissions; automatically obtain the functional description emissions.*

*In this paper we propose a simple and fast way of learning neural function according cartoon clouds contour plots emissions. Shows examples of the formation of clouds emissions of different configurations. Neural function effectively graphics output selective or general pollution of the territory and are suitable for further calculation or optimization.*

**Keywords:** sources of industrial emissions, cloud emission, pollution area, contour plots, neural Networks, filtering emissions

#### References

1. Fedosov V. V., Fedosova A. V. Polubeskonechnaja model' fil'trov mnogokomponentnyh vybrosov dlja grupy promyshlennyh istochnikov territorii. *Bezopasnost' zhiznedejatel'nosti*. 2013. № 2. P. 42–46.

2. Fedosov V. V., Fedosova A. V. Modelirovanie kontrolja i ograničeniya promyshlennyh vybrosov pri nalichii vetrovyh smeshhenij. *Vestnik komp'juternyh i informacionnyh tehnologij*. 2011. № 9. P. 29–35.

3. D'jakonov V. P., Kруглов V. V. MATLAB 6.5 SP1/7/7 SP1/7 SP2 + Simulink 5/6. Instrumenty iskusstvennogo intellekta i bioinformatiki. М.: SOLON-PRESS, 2006. 456 p.

#### Адрес редакции:

107076, Москва, Стромынский пер., 4

Телефон редакции журнала (499) 269-5510

E-mail: it@novtex.ru

Технический редактор Е. В. Конова.

Корректор Т. В. Пчелкина.

Сдано в набор 08.12.2014. Подписано в печать 23.01.2015. Формат 60×88 1/8. Бумага офсетная.

Усл. печ. л. 8,86. Заказ IT215. Цена договорная.

Журнал зарегистрирован в Министерстве Российской Федерации по делам печати, телерадиовещания и средств массовых коммуникаций.

Свидетельство о регистрации ПИ № 77-15565 от 02 июня 2003 г.

Оригинал-макет ООО "Авансед солюшнз". Отпечатано в ООО "Авансед солюшнз".

119071, г. Москва, Ленинский пр-т, д. 19, стр. 1.