

ГУЛАЙ А.В., ГУЛАЙ В.А., ДУБОВИК А.В.

МОДЕЛИРОВАНИЕ АВТОВОЛНОВЫХ ПРОЦЕССОВ В АКТИВНЫХ СРЕДАХ С НЕОДНОРОДНЫМИ СВОЙСТВАМИ

Белорусский национальный технический университет
г. Минск, Республика Беларусь

В работе представлены результаты компьютерного моделирования процессов возбуждения и распространения автоволн в распределенных активных средах с неоднородными свойствами. Исследование автоволн методом клеточных автоматов выполнено на основе модели Винера–Розенблюта, в соответствии с которой каждый элемент активной среды может находиться в одном из трех состояний: покоя, возбуждения и рефрактерности. Разработан программный модуль «AutoWaveModel» на языке C++ с использованием библиотеки Qt и технологии OpenGL для моделирования динамических процессов возбуждения спиральных волн и пейсмейкеров. Неоднородность свойств активной среды в рассматриваемой модели задается, в частности, путем введения в поле (объем) моделирования определенного количества неактивных элементов, распределенных по случайному закону. Установлено, что распад автоволн происходит при введении порядка 30–60 % неактивных элементов от их общего количества в модели, причем, процесс распространения волны становится более устойчивым при повышении коэффициента распада активатора всех элементов. В качестве одного из факторов, создающих неоднородность активной распределенной среды, рассмотрено также изменение коэффициента распада активатора в ее объеме. При этом каждой ячейке модели присваивается случайное значение указанного коэффициента, лежащее в заданном промежутке от минимальной до максимальной величины. При значительной разнице величин коэффициента распада активатора в соседних областях активной среды и достаточно высоком пороге возбуждения происходит искривление фронта волны за счет ее ускорения или замедления. В данном случае наблюдается также разрушение волны, которая не в состоянии преодолеть область с пониженным коэффициентом распада активатора.

Ключевые слова: математическое моделирование, активная среда, распределенная система, автоволновой процесс, клеточный автомат, модель Винера–Розенблюта

Введение

Автоволны – это самоподдерживающиеся нелинейные волны в активных средах, содержащих распределенные источники энергии, причем при распространении автоволн переносится относительно небольшая энергия, необходимая для синхронизации или переключения активной среды [1, 2]. К автоволновым процессам относятся колебательные химические реакции в активных средах, распространение импульса возбуждения по нервному волокну, волны химической сигнализации в колониях микроорганизмов, автоволны в сегнетоэлектрических и полупроводниковых пленках, автоволны развития популяций и распространения эпидемий, возникновение импульса возбуждения в синусовом узле сердца.

Автоволновое представление динамики развития явлений в активной среде применимо также в случае анализа эпистемологического процесса распространения знания в научном сообществе [3]. При анализе развития знания как процесса смены теорий в определенной, достаточно ограниченной научной области, его эволюция описывается в простейшем случае логистической кривой. Эта функция получается с учетом того, что коэффициент интен-

сивности размножения знания зависит от его массива, она уменьшается по мере изменения объема знания в результате исчерпания соответствующих ресурсов. Синергетическое взаимодействие информационных кластеров, а также проявляющийся «эффект истощения среды» формируют автоволновую модель эпистемологического процесса развития знания.

В современной эпистемологии требуется углубление методов математического моделирования и анализа процессов возникновения научных гипотез, расширения их влияния в научных представлениях, взаимодействия с параллельно возникающими предложениями [4–6]. При использовании автоволновых методов моделирования наиболее значимым является введение фрагментарных, случайных участков активной среды с разным уровнем активности, имитирующим изменение научного интереса к определенным гипотезам и теориям. В связи с вышеизложенным представляется актуальным компьютерное моделирование процессов возбуждения и развития автоволн в активных средах с неоднородными свойствами, модификации и распада автоволновой картины при наличии неоднородностей в поле (объеме) распространения автоволн.

Модель автоволнового процесса в активной среде с распределенными параметрами

Качественная картина процесса возбуждения автоволн может рассматриваться на основе построения математической модели, например, в виде дискретных сетей, образованных связанными между собой возбудимыми элементами. Для каждого элемента задаются определенные правила перехода между состояниями: состояние каждого элемента в момент времени $n+1$ однозначно определяется его собственным состоянием и состоянием его ближайших соседей по сети в предыдущий дискретный момент времени n , возбудимая среда при этом рассматривается как сеть клеточных автоматов.

Для компьютерного моделирования автоволновых процессов в активной среде используется обобщенная модель Винера–Розенблюта, в соответствии с которой активная среда может находиться в одном из трех состояний: покоя, возбуждения и рефрактерности. Приведенный в возбужденное состояние элемент среды пребывает в нем в течение некоторого времени, затем переходит в состояние рефрактерности и после этого возвращается в состояние покоя. Элемент среды переходит в возбужденное состояние либо при внешнем воздействии на него, либо в том случае, когда по соседству с ним оказывается возбужденный элемент. В обобщенной модели Винера–Розенблюта учитывается также пороговый характер активации и временное суммирование приходящих сигналов.

Сущность рассматриваемой обобщенной модели Винера–Розенблюта, достаточно подробно проанализирована в работах [7–9] и заключается в следующем. Двухмерная сеть образована элементами, состояние каждого из которых задается двумя величинами Φ_{ij}^n и U_{ij}^n . Указанные элементы нумеруются парой целых индексов i, j ; верхний индекс n указывает дискретный момент времени. Переходы между состояниями элементов осуществляются в соответствии с набором правил:

$$\Phi_{ij}^{n+1} = \begin{cases} \Phi_{ij}^n + 1, & \text{если } 0 < \Phi_{ij}^n < \tau_e + \tau_r, \\ 0, & \text{если } \Phi_{ij}^n = \tau_e + \tau_r, \\ 0, & \text{если } \Phi_{ij}^n = 0, U_{ij}^{n+1} < h, \\ 1, & \text{если } \Phi_{ij}^n = 0, U_{ij}^{n+1} \geq h, \end{cases}$$

где τ_e, τ_r – дискретная длительность, соответственно, состояний возбуждения и рефрактерности.

Переменная Φ_{ij}^n имеет смысл фазы элемента, находящегося в узле (i, j) , в момент времени n . Значение фазы $\Phi_{ij}^n = 0$ соответствует состоянию покоя; если $0 < \Phi_{ij}^n \leq \tau_e$, элемент находится в состоянии возбуждения, а состоянию рефрактерности соответствуют значения $\tau_e < \Phi_{ij}^n \leq \tau_e + \tau_r$. Переход элемента в узле (i, j) от состояния покоя к возбужденному состоянию происходит при превышении величиной U_{ij}^{n+1} порога h . Далее элемент среды совершает фиксиро-

ванную последовательность переходов, при каждом из которых значение фазы возрастает на единицу, а при достижении фазой величины $\tau_e + \tau_r$ возвращается к исходному значению в состоянии покоя.

Величина U_{ij}^n представляет собой концентрацию активатора в узле (i, j) в момент времени n . Считается, что в узлах сети происходят процессы распада и генерации активатора, причем активация производится лишь элементами, находящимися в данный момент времени в возбужденном состоянии:

$$U_{ij}^{n+1} = qgU_{ij}^n + \sum_{k,l} C(k,l)J_{i+k,j+l}^n,$$

$$J_{ij}^n = \begin{cases} 1, & \text{если } 0 < \Phi_{ij}^n \leq \tau_e, \\ 0, & \text{если } \tau_e < \Phi_{ij}^n \leq \tau_e + \tau_r, \text{ или } \Phi_{ij}^n = 0. \end{cases}$$

Значения $C(k, l)$ быстро падают с увеличением расстояния от узла, поэтому при построении модели, как правило, ограничиваются учетом вклада от ближайших соседей:

$$C(k,l) = \begin{cases} 1, & \text{если } |k| \leq 1, |l| \leq 1, \\ 0 & \text{в остальных случаях.} \end{cases}$$

В случае $h = 1, g = 0$ рассматриваемый элемент моделируемой среды возбуждает на каждом следующем шаге один из покоящихся элементов, которые находятся по соседству с ним. Если $h > 1, 0 < g \leq 1$, элемент среды выжидает, пока не будет накоплено пороговое значение концентрации активатора за счет его временного суммирования или благодаря притоку одновременно от нескольких соседних элементов. При этом время выжидания элемента тем больше, чем меньше число соседних с ним элементов находится в состоянии возбуждения. Благодаря этому проявляется зависимость скорости распространения волны возбуждения в активной среде от формы ее фронта.

Для моделирования автоволновых процессов в разных режимах выполнен программный модуль «AutoWaveModel» на языке C++ с использованием библиотеки Qt и технологии OpenGL и проанализирована динамика автоволновых процессов в случае возбуждения спиральных волн и пейсмейкеров [8]. Спиральные волны возбуждаются локальными источниками, не связанными с определенной точкой активной среды (например, с ее неоднородностью). В отличие от спиральных волн, возбуждение пейсмейкеров обусловлено наличием в активной среде неоднородностей как локальных источников автоволн. В анализируемой модели локальный периодически действующий источник автоволн задается как $\Phi_{ij}^{n+1} = \Phi_{ij}^n + 1$. Возбуждение, распространение и взаимодействие автоволн в рассматриваемой модели демонстрируется на поле, включающем множество элементов, представляющих собой клеточные автоматы. Автоволна в активной среде из клеточных автоматов изображается в виде сочетания темных, серых и светлых участков в рабочей области модели, представляющих, соответственно, режим возбуждения, рефрактерности и покоя.

Возбуждение автоволн в распределенной среде с неактивными элементами

Существенное влияние на процесс распространения автоволн в активной распределенной среде в реальных условиях, как правило, оказывает неоднородность ее свойств, которая в рассматриваемой модели может быть задана путем введения в поле (объем) моделирования определенного количества неактивных элементов, распределенных по случайному закону. В процессе анализа результатов моделирования установлено, что распад автоволн происходит при введении порядка $m = 30\text{--}60\%$ неактивных элементов от их общего количества в модели. Причем, процесс распространения волны становится более устойчивым при повышении коэффициента распада активатора: при $g = 0,7$ распад волны происходит в случае $m = 30\%$ неактивных элементов, в то время как при $g = 1,0$ волна деградирует в случае $m = 60\%$ (рис. 1).

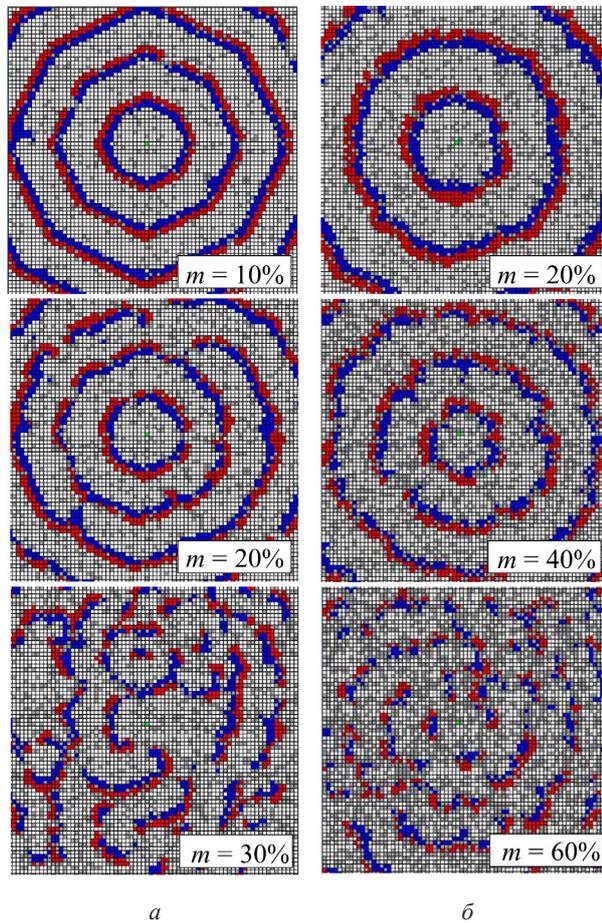


Рисунок 1. Вид волны при разных уровнях заполнения среды неактивными элементами: $\tau_e = 4$, $\tau_r = 4$, $h = 3$;
 $a - g = 0,7$; $b - g = 1,0$

На рисунке 2 представлен процесс возбуждения пейсмекера в объемной среде, случайным образом заполненной неактивными элементами. Показана динамика его изменения при увеличении

количества неактивных элементов до 40 % от их общего числа в моделируемом объеме. Трехмерная система в сравнении с плоской моделью является достаточно устойчивой, несмотря на довольно высокий процент заполнения области неактивными элементами. Наблюдаемый эффект можно объяснить, по-видимому, тем, что каждый элемент среды получает сигнал в трехмерной модели от гораздо большего количества возбужденных соседних клеток, чем в двухмерном варианте модели. Стоит также отметить уменьшение пространственного периода волны по мере роста количества неактивных элементов, что обусловлено, скорее всего, повышенной хаотизацией расположения клеточных элементов разной степени возбуждения в поле формирования волны.

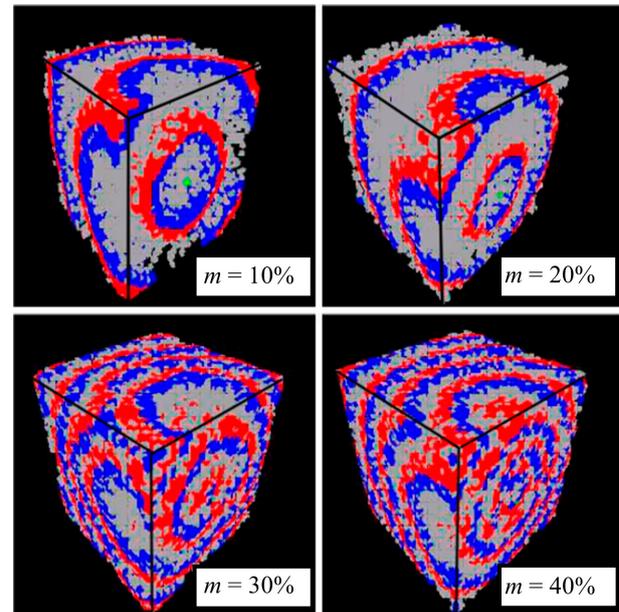


Рисунок 2. Возбуждение пейсмекера в объеме с неактивными элементами: $\tau_e = 4$, $\tau_r = 4$, $g = 0,7$, $h = 8$

Автоволны в распределенной среде с изменяющимся уровнем активации

В качестве одного из факторов, создающих неоднородность активной распределенной среды, рассматривается также изменение коэффициента распада активатора, который определяет, какой процент имеющейся энергии элемента передается на следующую итерацию моделирования. В этом случае каждой ячейке модели присваивается случайное значение указанного коэффициента, лежащее в заданном промежутке от минимальной до максимальной величины. Для согласования геометрических размеров неоднородностей активной среды и топологических параметров автоволн значения коэффициента распада активатора соседних ячеек усредняются, что приводит к формированию плавных переходов между отдельными участками среды, имеющими разные значения g (рис. 3).

Значительный интерес представляют результаты, полученные при сильных перепадах коэффициента распада активатора и достаточно высоком пороге возбуждения. В этом случае происходит искривление фронта волны за счет ускорения или замедления ее в зонах с резким перепадом данного коэффициента, а также разрушение волны, которая не в состоянии преодолеть область с пониженным коэффициентом. Наблюдается также вращение спиральной волны вокруг ближайшего к ней участка с пониженным коэффициентом распада активатора или дрейф волны, при котором смещение ее центра приводит к полному затуханию (рис. 4; наложение изображения волны на карту распада активаторов).

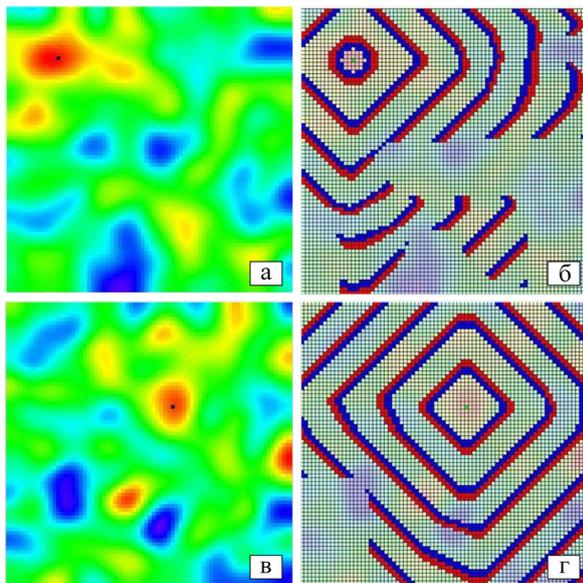


Рисунок 3. Распространение автоволны в активной среде:

$$\tau_e = 4, \tau_r = 4, h = 4; a, б - g_{\min} = 0,2, g_{\max} = 0,9;$$

$$в, г - g_{\min} = 0,3, g_{\max} = 0,9;$$

a, в – карты распада активатора; *б, г* – вид волны

Заключение

Проведены исследования процесса распространения автоволн в распределенных активных средах методом клеточных автоматов на основе использования обобщенной модели Винера-Розенблюта. Для моделирования динамических процессов возбуждения и разрушения спиральных волн и пейсмейкеров разработан программный модуль «AutoWaveModel» на языке C++ с использованием библиотеки Qt и технологии

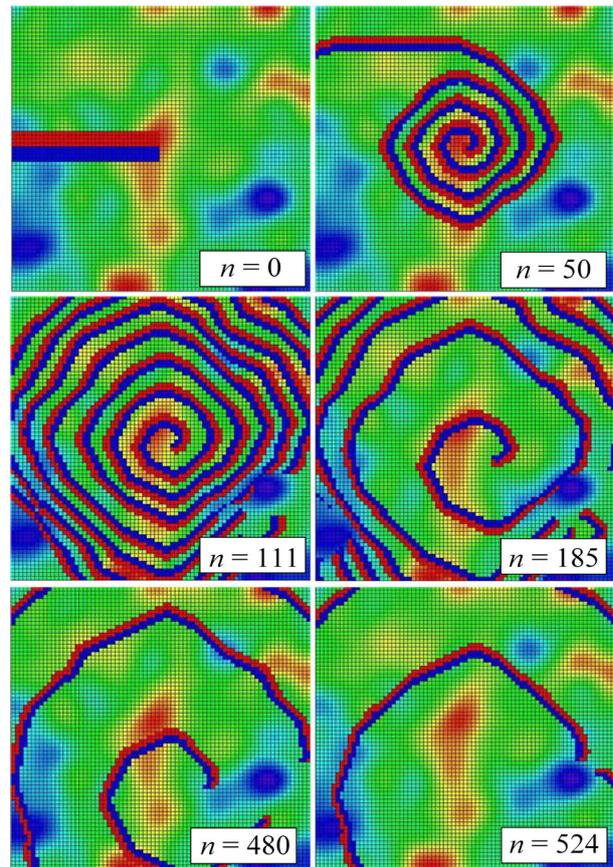


Рисунок 4. Возбуждение и дрейф волны в активной среде с изменяющимся коэффициентом распада активатора:

$$\tau_e = 4, \tau_r = 4, g_{\min} = 0,2, g_{\max} = 0,9, h = 5$$

Установлено, что в области активной среды с более высоким коэффициентом распада активатора скорость вращения спиральной волны повышается.

OpenGL. Неоднородность свойств активной среды задается путем распределения по случайному закону в объеме моделирования неактивных элементов или за счет изменения их коэффициента распада активатора. Показано, что разрушение автоволн происходит при введении порядка 30–60 % неактивных элементов от их общего количества модели или при значительной разнице величин коэффициента распада активатора в соседних областях активной среды.

ЛИТЕРАТУРА

1. Лоскутов, А.Ю. Основы теории сложных систем / А.Ю. Лоскутов, А.С. Михайлов. – М.-Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2007. – 620 с.
2. Лоскутов, А.Ю. Введение в синергетику: учеб. руководство / А.Ю. Лоскутов, А.С. Михайлов. – М.: Наука, 1990. – 272 с.
3. Яблонский, А.И. Математические модели в исследовании науки / А.И. Яблонский. – М.: Наука, 1986. – 352 с.

4. Гулай, А.В. Информационно-кибернетические модели когнитивной деятельности / А.В. Гулай, В.А. Гулай // Электроника-инфо. – 2017. – № 4. – С. 42-49.
5. Гулай, А.В. Анализ процесса поиска знаний в контексте представлений о диссипативных структурах / А.В. Гулай, А.И. Тесля // Высшая школа. – 2014. – № 1. – С. 26-31.
6. Гулай, А.В. Проблема алгоритмизации изобретательского поиска / А.В. Гулай // Интеллектуальная собственность в Беларуси. – 2014. – № 2. – С. 16–21.
7. Моделирование возбудимых структур / Отв. ред. В.И. Крюков. – Пушино: ОНТИ НЦБИ АН СССР, 1975. – 243 с.
8. Гулай, А.В. Моделирование автоволновых процессов в сенсорных средах методом клеточных автоматов / А.В. Гулай, В.А. Гулай, А.А. Колтун // Новый университет. – 2013. – № 11. – С. 4-10.
9. Матюшкин, И.В. Обзор по тематике клеточных автоматов на базе современных отечественных публикаций / И.В. Матюшкин, М.А. Заплетина // Компьютерные исследования и моделирование. – 2019. – Т. 11. – № 1. – С. 9-57.

REFERENCES

1. Loskutov, A.YU., Mihajlov A.S. Fundamentals of the theory of complex systems. M.– Izhevsk: Institut komp'yuternyh issledovaniy, 2007, 620 p.
2. Loskutov, A.YU., Mihajlov A.S. Introduction to Synergetics: Tutorial. M.: Nauka, 1990, 272 p.
3. Yablonskij, A.I. Mathematical models in the study of science. M.: Nauka, 1986, 352 p.
4. Gulaj A.V., Gulaj V.A. Information and cybernetic models of cognitive activity. Elektronika-info, 2017, № 4, pp. 42-49.
5. Gulaj A.V., Teslya A.I. Analysis of the process of knowledge search in the context of ideas about dissipative structures. Vyshejschaya shkola, 2014, № 1, pp. 26-31.
6. Gulaj, A.V. The problem of algorithmization of inventive search. Intellektual'naya sobstvennost' v Belarusi, 2014, № 2, pp. 16-21.
7. Modeling of excitable structures / Отв. ред. В. И. Крюков. – Пушино: ОНТИ НЦБИ АН СССР, 1975, 243 p.
8. Gulaj A.V., Gulaj V.A., Koltun A.A. Modeling of autowave processes in sensory media by the method of cellular automata. Novyj universitet, 2013, № 11, pp. 4-10.
9. Matyushkin I.V., Zapletina M.A. Review on the subject of cellular automata based on modern domestic publications. Komp'yuternye issledovaniya i modelirovanie, 2019, vol. 11, № 1, pp. 9-57.

GULAJ A.V., GULAJ V.A., DUBOVIK A.V.

MODELING OF AUTOWAVE PROCESSES IN ACTIVE MEDIA WITH INHOMOGENEOUS PROPERTIES

*Belarusian National Technical University
Minsk, Republic of Belarus*

This paper shows the results of computer modeling of the processes of excitation and propagation of autowaves in distributed active media with inhomogeneous properties. The study of autowaves by the cellular automata method is based on the Wiener–Rosenbluth model, according to which each element of the active environment can be in one of three states: rest, excitation and refractoriness. The software module "AutoWaveModel" has been developed in C++ using the Qt library and OpenGL technology for modeling dynamic processes of excitation of spiral waves and pacemakers. The heterogeneity of the properties of the active environment in the model under consideration is set, in particular, by introducing into the field (volume) of modeling a certain number of inactive elements distributed according to a random law. It is established that the decay of autowaves occurs when about 30-60% of inactive elements are introduced from their total number in the model, moreover, the wave propagation process becomes more stable with an increase in the decay coefficient of the activator of all elements. As one of the factors creating heterogeneity of the active distributed environment, the change in the decay coefficient of the activator in its volume is also considered. In this case, each cell of the model is assigned a random value of the specified coefficient, lying in a given interval from the minimum to the maximum value. With a significant difference in the values of the activator decay coefficient in near areas of the active environment and a sufficiently high excitation threshold, the wave front is curved due to its acceleration or deceleration. In this case, the destruction of the wave is also observed, which is unable to overcome the area with a reduced decay coefficient of the activator.

Keywords: *mathematical modeling, active environment, distributed system, autowave process, cellular automat, Wiener-Rosenbluth model*



Гулай А.В., кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Интеллектуальные и мехатронные системы» БНТУ. Окончил Минский радиотехнический институт, лауреат Государственной премии в области науки и техники. Область научных интересов: методологические проблемы интеллектуальных технологий; интеллектуальные системы формирования знаний; построение интеллектуальных и сенсорных систем.

Gulay A.V., PhD, associate Professor, head of the Department “Intelligent and mechatronic systems” of BNTU. Graduated from the Minsk Radio Engineering Institute, laureate of the State Prize in Science and Technology. His scientific interests focus on methodological problems of intelligent technologies; intelligent systems of knowledge formation; construction of intelligent and sensor systems.

E-mail: is@bntu.by



Гулай В.А., старший преподаватель кафедры «Интеллектуальные и мехатронные системы» БНТУ. Окончил Белорусский государственный университет, аспирантуру БНТУ. Область научных интересов: физика и технологии сенсорных микро-наносистем; моделирование интеллектуальных и сенсорных систем.

Gulay V.A., senior lectures of the Department “Intelligent and mechatronic systems” of BNTU. Graduated from the Belarusian State University, completed postgraduate study of BNTU. His scientific interests focus on physics and technologies of sensor micro-nanosystems; modeling of intelligent and sensor systems.

E-mail: is@bntu.by



Дубовик А.В., старший преподаватель кафедры «Интеллектуальные и мехатронные системы», аспирант БНТУ. Окончила Белорусский национальный технический университет. Область научных интересов: моделирование сенсорных наноматериалов на основе фуллеренов и углеродных нанотрубок.

Dubovik A.V., senior lectures of the Department “Intelligent and mechatronic systems” and PhD student of BNTU. Graduated from the Belarusian National Technical University. Her scientific interests focus on modeling of sensor nanomaterials based on fullerenes and carbon nanotubes.

E-mail: is@bntu.by