

Для выяснения, какой из приближенных методов адекватнее описывает поведение построенной модели, было проведено численное решение методом gkf45 (Рунге–Кутта–Фельберга 4–5-го порядка). На рис. 3 оно отмечено линией «точка-тире».

**Заключение.** Из проведенных сравнений можно заключить, что гамильтонов подход дает достаточно близкое к «истинному» решение, но при математическом моделировании заставляет каждое решение получать с помощью последовательных итераций, что не всегда удобно для реализации. Второй подход через представление решения в виде отрезка ряда по скорости дает аналитические формулы для всех решений, однако его применение целесообразно лишь при малых скоростях потока.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Гантмахер Ф.Р. Лекции по аналитической механике. – М.: Физматлит, 2002. – 264 с.
2. Илюхин А.А. Пространственные задачи нелинейной теории упругих стержней. – Киев: Наукова думка, 1979. – 216 с.
3. Илюхин А.А., Ступко С.А. Приближенное решение задачи о равновесии пластинки на упругом стержне в потоке воздуха // Механика твердого тела. – Киев: Наукова думка, 2000. – Вып. 30. – С. 242-246.
4. Илюхин А.А., Шретер С.А. Поведение пластинки на упругом стержне в аэродинамическом потоке // Научно-технический вестник Поволжья. – Казань, 2011. – Вып. 6. – С. 43-47.
5. Локшин Б.Я., Привалов В.А., Самсонов В.А. Введение в задачу о движении тела в сопротивляющейся среде. – М.: Изд-во Мос. ун-та, 1986. – 86 с.

Статью рекомендовал к опубликованию к.т.н., доцент С.С. Белоконова.

**Илюхин Александр Алексеевич** – Таганрогский государственный педагогический институт им. А.П.Чехова; e-mail: aleilyukhin@yandex.ru; 347936, г. Таганрог, ул. Инициативная, 48; тел.: 89043465321; кафедра математического анализа; зав. кафедрой; д.ф.-м.н.; профессор.

**Шретер Сергей Алексеевич** – e-mail: sergshre@yandex.ru; тел.: 89885307372; кафедра математического анализа; аспирант.

**Pyukhin Alexander Alexeyevich** – Anton Chekhov Taganrog State Pedagogical Institute; e-mail: aleilyukhin@yandex.ru; 48, Initiative street, Taganrog, 347936, Russia; phone: 89043465321; the department of mathematical analysis; head of the department; dr. of phis.-math. sc.; professor.

**Shreter Sergey Alexeyevich** – e-mail: sergshre@yandex.ru; phone: 89885307372; the department of mathematical analysis; postgraduate student.

УДК 004.93; 539.1.08

**А.М. Бакаляров, В.Г. Бондур, М.Д. Каретников, В.И. Лебедев, В.А. Макаров,  
Г.В. Мурадян, А.Б. Мурынин, Г.В. Яковлев**

#### **ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПЕРЕНОСА ИЗЛУЧЕНИЯ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ ДИСТАНЦИОННОГО ОБНАРУЖЕНИЯ ИСТОЧНИКА ГАММА-КВАНТОВ С ЗАДАННЫМ СПЕКТРОМ**

*В рамках реализации математических методов распознавания образов разработана и проверена программная методика обнаружения источника гамма-квантов с известным спектром, базирующаяся на использовании обучаемых нейронных сетей для разделения спектров, измеренных гамма-спектрометром, на два класса: фон и эффект плюс фон. Проверка осуществлялась с помощью численного моделирования переноса излучения методом Монте-Карло. Были промоделированы реальные условия эксперимента и получен набор спектров, который использовался для обучения многослойного перцептрона. Тестирование*

было проведено отдельно для фона с целью получения вероятности ложной тревоги и отдельно для источника в присутствии фона с целью оценки вероятности обнаружения источника гамма-излучения.

*Источник гамма-квантов; нейронная сеть; гамма-спектрометр; численное моделирование; метод Монте-Карло; обучение перцептрона; обнаружение.*

**A.M. Bakalyarov, V.G. Bondur, M.D. Karetnikov, V.I. Lebedev, V.A. Makarov,  
G.V. Muradyan, A.B. Murynin, G.V. Yakovlev**

### **USAGE OF A NUMERICAL SIMULATION OF RADIATION TRANSPORT FOR SOLVING THE PROBLEM OF REMOTE DETECTION OF A GAMMA-RAY SOURCE WITH A GIVEN SPECTRUM**

*Within the framework of mathematical methods applied to pattern recognition, a procedure for detection of a gamma-ray source with a given spectrum was developed and verified. The procedure involves usage of learning neural networks for separation into two classes (background and effect plus background) of spectra, obtained by means of gamma-spectrometer. Verification was carried out by means of a numerical simulation of radiation transport with Monte-Carlo method. Real conditions of an experiment were simulated, a set of spectra was obtained that was used for learning of multilayer perceptron. Verification was carried out separately for background in order to obtain a probability for false alarm and separately for the source with background in order to estimate a probability for detection of that source.*

*Gamma-ray source; neural network; gamma-spectrometer; numerical simulation; Monte-Carlo method; perceptron learning; detection.*

**Введение.** Разработка методов дистанционного обнаружения источника гамма-излучения связана с рядом важных практических применений, для которых характерна необходимость оценивать вероятности возникновения ошибок 1-го и 2-го рода (вероятности ложной тревоги и вероятности пропуска источника) при низком уровне полезного сигнала в присутствии нестационарного фонового излучения.

Для решения такой задачи использовано численное Монте-Карло [1, 2] моделирование переноса излучения с учетом регистрации его гамма-спектрометром [3, 4].

Для учета изменения фоновых условий в системе распознавания целесообразно привлечь методы классификации с обучением по прецедентам с применением искусственных нейронных сетей [5–7].

**Методика численного моделирования фона и спектра источника.** Моделирование проводилось с помощью программного пакета GEANT [8]. Рассмотрена задача обнаружения точечного источника цезия-137, находящегося на поверхности земли. Спектрометр размещен на авиационном носителе, пролетающем над источником с заданной скоростью на определенной высоте. При моделировании фона учитывается радиоактивность почвы и атмосферы, включая изотопы рядов урана, тория, калий-40, а также присутствие радона.

При моделировании радиоактивности в грунте принималось, что он загрязнен равномерно по объему. Учитывались источники, расположенные до глубины 150 см. При моделировании радона предполагалось, что его концентрация по высоте экспоненциально убывает с показателем экспоненты 1,38 км.

Моделировалась регистрация гамма-квантов в конкретном сцинтилляционном гамма-спектрометре. Для определения спектров детектора в присутствии источника моделировалось перемещение детектора над источником. Разработка модели предполагала вычисление полной скорости счета детектора и его спектра в зависимости от перемещения детектора относительно точечного источника заданной активности. Задача сводилась к вычислению функции отклика детектора на воздействие источника при движении и сложению полученной функции с вычисленным фоном. Рассматривались два варианта перемещения детектора над источником на

высоте 200 метров при скорости авиационного носителя 240 км/ч: 1) непосредственно над источником; 2) в стороне, на расстоянии 100 м. Активность источника была задана равной 0,5 Ки по линии с энергией 660 кэВ со 100 %-ным выходом.

**Результаты моделирования.** В качестве обучаемого классификатора использовался четырехслойный перцептрон. Входной слой содержал 40 нейронов, первый промежуточный слой – 15 нейронов, второй промежуточный слой – 8 нейронов и выходной слой – один нейрон.

Для обучения формировался набор данных, состоящий из 20 000 событий (поровну фоновых событий и событий с присутствием источника Cs-137). Процесс обучения состоял в предъявлении исходного файла (состоящего из 20 000 событий) 20 000 раз. В результате этого были сформированы веса связи ( $w_{ij}$ ) между нейронами предыдущих и последующих слоев. При получении фоновых спектров для обучения предполагалось, что фон измерялся 12 секунд. Эффект брался тоже за 12 секунд (6 секунд до источника, 6 после). Фон для обучения не был постоянным. От события к событию экспозиционная доза могла меняться в пределах от 8 до 12 мкР/ч на высоте 1 м над поверхностью земли. При этом половина событий с источником (5 000 событий) была промоделирована для случая пролета непосредственно над источником, а вторая половина событий – для случая пролета в 100 метрах в стороне от источника. Обучение и тестирование проводились с помощью программного пакета JETNET 3.0 [9].

Результатом процесса обучения был сохраненный файл с весами нейронной сети  $w_{ij}$ .

Тестирование проводилось в два этапа. Сначала проводилось тестирование фоновых условий. Промоделировано  $10^4$  спектров фона за время 1 секунда. Для каждой секунды фон варьировался от 8 до 12 мкР/ч с произвольной структурой по изотопам (см. выше). Далее моделировался метод скользящего окна, т.е. бралась сумма отсчетов для отрезков времени по 12 секунд. Таким образом, было получено  $10^4$  событий для тестирования пролета без источника на высоте 200 метров. Выбрав порог 0,01, получаем вероятность ложной тревоги менее чем  $10^{-3}$ .

Моделировался метод скользящего окна по 12 секунд. Для каждого случая выбиралось максимальное значение выхода нейронной сети. После тестирования всех 100 событий, была получена величина выхода перцептрона для каждого из них больше чем 0,999. Для выбранного нами порога 0,01 это означает, что при тестировании вероятность обнаружения источника Cs-137 оказалась близкой к 1.

С целью проверки обнаружительных возможностей рассматриваемого детектора были проведены такие же тесты, только для источников с меньшей активностью. Тесты были проведены для источников, имеющих активность 0,5; 0,25; и 0,1 от номинальной. Для этих источников вероятность обнаружения составила соответственно 95, 37 и 3 %. Вероятность обнаружения 0,5 ожидается для источника с активностью примерно 0,35 от номинального значения ( $6,5 \cdot 10^9$  гамма-квантов в секунду).

Следует отметить одну важную особенность предлагаемой методики обнаружения источника. Она позволяет не только обнаружить источник, но и идентифицировать его.

**Заключение.** Разработанная методика обнаружения источника гамма-излучения с заданным спектром с помощью искусственных нейронных сетей имеет преимущество перед обычно используемыми приемами обнаружения источника по характерным пикам гамма-спектра – она позволяет учитывать динамику изменения спектров (регистрируемых известным детектором) как для искомого источника, так и для фона. Это обстоятельство является фактором, предоставляющим возможности для улучшения качества классификации объектов. На данной стадии работы создан и проверен, с использованием средств численного моделирования, программный инструментарий, который позволит количественно оценивать обнаружительную способность методики применительно к решению различных конкретных задач классификации.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Соболь И.М.* Метод Монте-Карло. – М.: Наука, 1985.
2. *Ермаков С.М., Михайлов Г.А.* Курс статистического моделирования. – М.: Наука, 1976.
3. *Бондур В.Г., Макаров В.А., Мурынин А.Б.* Дистанционный метод поиска минералов с использованием мобильного источника высокоэнергетических протонов // Известия вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2010. – № 3. – С. 57-62.
4. *Бондур В.Г., Макаров В.А., Мурынин А.Б.* Дистанционный поиск сложных минералов с использованием высокоэнергетических протонов // Известия вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2011. – № 1. – С. 73-80.
5. *Журавлев Ю.И., Рязанов В.В., Сенько О.В.* Распознавание. Математические методы. Программная система. Практические применения. – М.: Фазис, 2006.
6. *Бакаляров А.М., Балыш А.Я., Беляев С.Т., Лебедев В.И.* Использование искусственных нейронных сетей для разделения событий по форме импульса. Препринт НИЦ «Курчатовский институт» ИАЭ-6089/2. – М., 1998.
7. *Bakalyarov A.M., Balysh A.Ya., Belyaev S.T., Lebedev V.I. and Zhukov S.V.* Identification of single events in the HPGe detector: Comparison of various methods based on the analysis of simulated pulse shapes. Hep-ex 0203017 2002.
8. GEANT3.21 Detector Description and Simulation Tool, Manual, CERN Program Library Long Writeup W5013.
9. *Peterson C. et al.,* JETNET 3.0 – A Versatile Artificial Neural Network Package, 1993.

Статью рекомендовал к опубликованию к.т.н. А.И. Климов.

**Бакаляров Александр Михайлович** – Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт»; e-mail: bamhome@cnt.ru; 123182, г. Москва, пл. Академика Курчатова, 1; тел.: +74955149417; Институт общей и ядерной физики; лаборатория детекторов излучений; старший научный сотрудник.

**Каретников Максим Донатович** – e-mail: mdk@electronics.kiae.ru; тел. +74991969042; Институт общей и ядерной физики; лаборатория импульсной спектрометрии; ведущий научный сотрудник; к.т.н.

**Лебедев Валентин Иванович** – e-mail: lebedev@polyn.kiae.su; тел.: +74991969437; Институт общей и ядерной физики; лаборатория детекторов излучений; начальник лаборатории, к.ф.-м.н.; старший научный сотрудник.

**Мурадян Генрик Ваганович** – e-mail: muradian@kcsr.kiae.ru; тел.: +74991967670; Институт общей и ядерной физики; лаборатория нейтронной физики; начальник лаборатории; д.ф.-м.н.

**Яковлев Генрих Васильевич** – e-mail: Yakovlev\_GV@nrcki.ru; тел.: +74991967265; советник директора Центра (НИЦ «Курчатовский институт»); к.т.н.; старший научный сотрудник.

**Бондур Валерий Григорьевич** – Научно-исследовательский институт аэрокосмического мониторинга «Аэрокосмос»; e-mail: vgbondur@aerocosmos.info; 105064, г. Москва, Горюховский пер., 4; тел. +74956321654; директор; академик РАН; д.т.н.; профессор.

**Макаров Виктор Александрович** – e-mail: ultramaker@rambler.ru; отдел оперативного мониторинга; научный сотрудник; к.т.н.

**Мурынин Александр Борисович** – e-mail: AMurynin@bk.ru; тел.: +79266902722; вычислительный центр им. А.А. Дородницына РАН; старший научный сотрудник; к.т.н.

**Bakalyarov Aleksandr Mikhailovich** – National Research Centre “Kurchatov Institute”; e-mail: bamhome@cnt.ru; 1, Akademika Kurchatova pl., Moscow, 123182, Russia; phone: +74955149417; Institute of General and Nuclear Physics; laboratory for radiation detectors; senior researcher.

**Karetnikov Maxim Donatovich** – e-mail: mdk@electronics.kiae.ru; phone: +74991969042; Institute of General and Nuclear Physics; Laboratory for pulse spectrometry; leading researcher, cand. of eng. sc.

**Lebedev Valentin Ivanovich** – e-mail: lebedev@polyn.kiae.su; phone: +74991969437; Institute of General and Nuclear Physics; laboratory for radiation detectors; head of laboratory; cand. of phis.-math. sc.; senior researcher.

**Muradian Genrik Vaganovich** – e-mail: muradian@kcsr.kiae.ru; phone: +74991967670; Institute of General and Nuclear Physics; neutron physics laboratory; head of laboratory; dr. of phis.-math. sc.

**Yakovlev Genrikh Vasilyevich** – e-mail: Yakovlev\_GV@nrcki.ru; phone: +74991967265; advisor to the director of the center; cand. of eng. sc.; senior researcher.

**Bondur Valery Grigoryevich** – Research Institute for Aerospace Monitoring “Aerocosmos”; e-mail: vgbondur@aerocosmos.info; 4, Gorokhovskij, Moskow, 105064, Russia; phone: +74956321654; director; academician of Russian Academy of Sciences; dr. of eng. sc.; professor.

**Makarov Victor Aleksandrovich** – e-mail: ultramaker@rambler.ru; phone: +74956321654; division of prompt monitoring; research scientist; cand. of eng. sc.

**Murynin Alexander Borisovich** – e-mail: AMurynin@bk.ru; phone: +79266902722; Dorodnicyn computing centre of RAS; senior researcher; cand. of eng. sc.

УДК 621.382.3

**К.О. Петросянц, М.В. Кожухов, Д.А. Попов, Е.В. Орехов**

**МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ, ВСТРОЕННЫЕ В СИСТЕМУ TCAD,  
ДЛЯ УЧЕТА ВЛИЯНИЯ ГАММА- И НЕЙТРОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ  
НА ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ПРИБОРЫ**

*В работе представлены математические модели для учета влияния поглощенной дозы гамма-излучения и интегрального потока нейтронов на характеристики субмикронных транзисторов. Описана процедура встраивания моделей в систему приборно-технологического моделирования Synopsys TCAD. Рассчитаны следующие зависимости: 1) сток-затворные характеристики для верхнего и нижнего затворов и ток утечки МОП-транзистора с длиной затвора 90 нм, изготовленного по технологии кремний на изоляторе, для различных поглощенных доз гамма-излучения; 2) фактор повреждений от интегрального потока нейтронов для гетеропереходного биполярного транзистора, выполненного по 0,13 мкм технологии кремний-германий.*

*Приборно-технологическое моделирование; поглощенная доза; гамма-излучение; интегральный поток нейтронов; МОП-транзистор; гетеропереходный биполярный транзистор.*

**К.О. Petrosyants, M.V. Kozhukhov, D.A. Popov, E.V. Orekhov**

**MATHEMATICAL MODELS EMBEDDED INTO TCAD TO ACCOUNT FOR  
GAMMA- AND NEUTRON RADIATION EFFECTS ON SEMICONDUCTOR  
DEVICES**

*Mathematical models to account for the influence of total dose of gamma radiation and the neutron fluence on the characteristics of submicron transistors is presented in the paper. The procedure of models embedding to the Synopsys TCAD software is described. Simulation of the following dependencies: 1) drain current versus front and back gate voltage and leakage current of the MOS transistor with 90 nm gate length, fabricated on silicon on insulator technology, for different total doses of gamma radiation; 2) damage factor versus neutron fluence for the heterojunction bipolar transistor, fabricated on 0,13-micron silicon germanium technology is performed.*

*TCAD; total dose; gamma irradiation; neutron fluence; MOS transistor; heterojunction bipolar transistor.*

**Введение.** Система TCAD (Technology Computer-Aided Design) широко используется для моделирования полупроводниковых приборов и элементов больших интегральных схем (БИС), производимых по различным технологиям [1]. Математической основой данной системы является численное решение фундамен-