

**Р. К. Спиоров, А. Н. Никитин**

*Государственное научное учреждение «Институт радиобиологии Национальной академии наук Беларуси», г. Гомель, Республика Беларусь*

## **НЕЙРОННЫЕ СЕТИ В СПЕКТРОМЕТРИИ РАДИОАКТИВНЫХ ИЗЛУЧЕНИЙ: СОСТОЯНИЕ ПРОБЛЕМЫ**

*В статье рассмотрены вопросы применения искусственных нейронных сетей в спектрометрии радиоактивных излучений. Представлен обзор состояния проблемы на современном этапе. В заключении приведены преимущества и недостатки применения нейронных сетей в обработке спектрометрической информации.*

➤ **Ключевые слова:** нейронные сети, спектрометрия, радиоэкология.

### **Введение**

Качественный и количественный анализ радиоактивных изотопов требуется при описании и оценке радиационной обстановки для контроля окружающей среды в радиоэкологии, радиационной медицине и других смежных дисциплинах, а также для организации защиты от ионизирующего излучения в радиационной безопасности. На сегодняшний день для измерения ядерных излучений повсеместно нашли широкое применение спектрометрические методы анализа. Тем не менее, спектрометрические исследования являются непростой задачей вследствие самой природы ионизирующего излучения. И, несмотря на то, что с каждым годом совершенствуются по всем направлениям методы подготовки образцов к анализу (пробоподготовка, радиохимическое разделение, изготовление счетных мишеней), а также увеличиваются чувствительность и разрешение детекторов и других аппаратных компонентов современных спектрометров, обработка спектрометрической информации невозможна без вмешательства человека. Ю. А. Зайцев [1] отмечает, что при машинной обработке аппаратных спектров разнообразие условий обработки резко снижает производительность труда, усложняет операторскую работу, приводит к грубым ошибкам.

Существует множество способов и уже реализованных программных продуктов с классическими подходами для обработки спектров излучения, однако актуальным и активно развивающимся на сегодняшний день является вопрос о применении с этой целью парадигмы искусственных нейронных сетей. Нейронные сети успешно зарекомендовали себя в различных областях естествознания, а также в бизнесе, технике и других задачах, связанных с классификацией, прогнозированием и управлением [2]. Преимущества применения нейронных сетей заключаются, во-первых, в скорости обработки информации (основные вычисления приходятся на момент обучения), во-вторых, в автоматизации процесса (исключено человеческое влияние) – требуется в тех случаях, когда необходим быстрый ответ, но не менее важна точность.

**Цель статьи** – анализ возможности использования нейронных сетей для обработки спектрометрической информации при измерении активности радиоактивных изотопов.

### **Оценка качества спектра**

Активное изучение вопроса возможности применения нейронных сетей для обработки спектрометрической информации началось в середине 90-х годов XX в. после публикации «Атомный спектральный анализ посредством искусственных нейронных сетей при управлении отходами» исследователей из США Р.Е. Keller, L. J. Kangas и соавторов [3]. Перед авторами возникла проблема быстрого и качественного определения радиоактивных изотопов в огромной массе токсичных отходов, образовавшихся в результате сорокалетнего (на момент написания публикации) производства плутония на Хэнфордском комплексе. Исследователи поставили перед собой цель продемонстрировать применение парадигмы нейронных сетей для обработки информации в реальном времени, а именно: для автоматизированной идентификации изотопов-загрязнителей. Ими было рассмотрено две проблемы: во-первых, возможность использования искусственной нейронной сети для определения качества альфа-спектров и, во-вторых, идентификация изотопов исходя из данных гамма-спектров.

При обучении сети авторы использовали данные ста тридцати девяти спектров, отличающихся по качеству, ввиду калибровки прибора или наличию осадка на мембранном фильтре. Предварительно опытными операторами была дана качественная оценка каждому спектру по шкале от нуля до де-

сяти. Коэффициент качества от нуля до трех получили спектры приемлемые для определения уровня плутония, от четырех до шести – допустимые, и, наконец, выше шести – спектры низкого качества, свидетельствующие о необходимости перекалибровки прибора или повторном анализе. Задача нейронной сети состояла в расчете коэффициента качества спектра. Пятьсот двенадцать каналов исходных альфа-спектров были уменьшены до двухсот пятидесяти шести во время получения данных. Из оставшихся необходимую информацию несли каналы в диапазоне от сорока до двухсот тридцати девяти. С целью уменьшения входных данных для нейронной сети, авторы сократили число каналов до двадцати, рассчитав среднее значение счета из десяти последовательных каналов. При этом они отметили, что подобное сокращение разрешения спектра было подходящим для относительно немногих спектров, использованных в описываемом исследовании.

Перед представлением данных нейронной сети, значения из каждого канала во всех спектрах были нормализованы по данным канала с максимальным счетом в каждом спектре. Структура нейронной сети была следующей: двадцать входных нейронов на которые подавались нормализованные значения со спектров уменьшенного разрешения, один скрытый слой, состоящий из пятнадцати нейронов, и один выходной нейрон, выдающий коэффициент качества спектра. Для обучения нейронной сети использовали стандартный алгоритм обратного распространения ошибки. Сеть обучали в течение трех тысяч эпох до начала постоянного увеличения ошибки валидации. После обучения качество нейронной сети было проверено тестированием, в котором использовали четыре одинаковые по количеству группы спектров, не участвующих в обучении. Отклонению в пределах  $\pm 1$  значения коэффициента качества соответствовало 83,5% спектров. Таким образом, авторы доказали возможность передачи знаний о качестве альфа-спектра от оператора искусственным нейронным сетям. К подобным выводам приходят также ученые из Японии [4], Великобритании [5] и Индонезии [6], подчеркивая качественное выполнение поставленных задач.

### ***Идентификация радиоактивных изотопов***

Еще одно применение нейронных сетей, как отмечают М. К. Alam, S. L. Stanton и другие исследователи [7], возможно в случае решения проблемы автоматической идентификации радиоактивных изотопов в реальном времени по спектрам гамма-излучения. Традиционный подход к идентификации искомого изотопа по спектру гамма-излучения сводится к поиску пика и подходящих кривых. Этот подход инициирует повторяющийся процесс разложения и восстановления спектра до тех пор, пока создаваемый математическими методами спектр не будет соответствовать истинному. Зачастую этот процесс требует большого объема вычислений, а нередко – и ручного вмешательства. Нейронная сеть в свою очередь использует распознавание образов на всем спектре.

Успешное решение этой проблемы представлено в разработках украинских ученых А. В. Кочергина и С. С. Пивоварцева [8]. Авторы предлагают использовать метод идентификации радионуклидов по реконструированному физическому спектру гамма-излучения с использованием трехслойной нейронной сети прямого распространения. В терминологии нейронных сетей данная задача относится к классу классификационных, для решения которой применимы многослойные полносвязные сети прямого распространения. Ввиду того, что условия и временные ограничения процедуры измерения и идентификации приводят к тому, что в большинстве случаев результирующий гамма-спектр имеет сложный характер со значительным количеством мультиплетов, тяжелых для идентификации при реальных уровнях скорости счета, ненамного превышающих фоновую загрузку детектора, число одновременно идентифицированных изотопов не может быть велико, поэтому авторы принимают решение ограничить число одновременно идентифицируемых нуклидов пятью. При этом отмечают, что столкнулись со значительными трудностями при попытке построить и обучить одну общую нейронную сеть для одновременной однопроходной идентификации любого нуклида использованной библиотеки нуклидов. В связи с этим ими было принято решение перейти к многопроходной процедуре идентификации, когда для поиска каждого нуклида из библиотеки строится и тренируется отдельная искусственная нейронная сеть.

В качестве входных данных А. В. Кочергин и С. С. Пивоварцев использовали восстановленный 256-канальный спектр гамма-излучения, при этом под восстановленным спектром понимается энергетическое распределение плотности потока гамма-квантов, оцененное по аппаратному спектру. Применение не реальных аппаратных спектров, а модельных, объяснили практической невозможностью экспериментального получения спектров всех возможных комбинаций нуклидов и их относительных активностей. Для обучения сети применяли метод сопряженных градиентов с адаптивной корректировкой длины шага.

В результате исследования ими были сделаны следующие выводы: во-первых, метод идентификации нейронными сетями радиоактивных изотопов по гамма-спектру достаточно трудоемок на предварительном этапе и чувствителен к качеству и количеству информации в обучающей выборке, во-вторых,

обученная нейронная сеть показала результаты близкие к 100 % для идентификации единичных нуклидов с простым линейчатым спектром, но при этом отмечается, что при идентификации нуклидов, обладающих сложным линейчатым спектром, результаты неоднозначны, в-третьих, ввиду несомненного преимущества благодаря однопроходной процедуре идентификации, метод является перспективным и нуждающимся в дальнейшем развитии, в частности, ограничением входных данных обучающей выборки теми каналами, в которых могут находиться пики полного поглощения определяемого изотопа.

### ***Определение отношения активностей***

Еще одной немаловажной проблемой, с которой успешно справляются искусственные нейронные сети при обработке спектрометрической информации, является анализ отношений активностей одного элемента к другому. Данная проблема очень часто возникает в радиоэкологии в связи с необходимостью определения типа источника загрязнения: является ли он природного происхождения или же антропогенного. Но приходится ее решать и в атомной энергетике, при управлении радиоактивными отходами, в медицинской физике, геологии, геохронологии [9] и других естественнонаучных дисциплинах, а также при скрининге на международных границах [10].

В качестве примера успешного решения такого рода задач нейронными сетями, можно привести недавнее исследование отношений активности урана-234 к урану-238 проведенное иранскими учеными M. R. Einian, S. M. R. Aghamiri и R. Ghaderi [11]. Для природного урана отношение удельной активности  $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$  в почве, как правило, варьирует от 0,5 до 1,2, для урана техногенного происхождения это значение превышает 1,2 (обогащенный уран) или же ниже 0,5 (обедненный уран) [12]. Количественное определение урана проводят радиохимическим методом, однако из-за недостаточно качественной очистки от железа, радия-226 и других элементов, пик урана-234 на альфа-спектре может быть ассиметрично расширен и в этом случае происходит наложение пиков альфа-частиц урана-234 и урана-238, что затрудняет интерпретацию результатов. Авторы пошли по альтернативному пути обработки таких спектров посредством применения искусственных нейронных сетей по нескольким причинам. Во-первых, главное преимущество нейронных сетей, по их мнению, состоит в том, что нет необходимости в разработке параметрической математической модели, т.к. сеть обучается на примерах и обрабатывает варианты на основании входных и выходных данных, не имея никаких предположений о характере их взаимосвязи. Во-вторых, искусственные нейронные сети устраняют ограничения классических подходов, получая необходимую информацию из данных, поступающих на вход. При этом отмечается, что для обучения необходимо достаточное количество исходных данных.

В описываемой работе следует отметить интересный подход исследователей, примененный для уменьшения количества входных нейронов. Проблема многочисленных входов выражается в увеличении сложности структуры сети, что нежелательно, поскольку приводит к ухудшению возможностей нейронной сети к обобщению. Для уменьшения входных нейронов, авторами была отобрана та часть спектра урана, которая лежит в диапазоне 3,5–5,5 МэВ. В этот диапазон попадают три пика соответствующие альфа-частицам, характерным для урана-238, урана-234 и урана-232, используемого в качестве метки. Разрешение спектра было уменьшено в два раза, путем расчета среднего значения счета импульсов из двух соседних каналов. По этим данным построили график, на оси абсцисс которого располагалась энергия каналов, а на оси ординат сумма счета импульсов в предыдущих каналах и текущем. На новой кривой пики выглядят как резкое увеличение наклона кривой средних. С другой стороны, там, где пиков нет, располагаются области минимального наклона. Рассчитав для каждой точки значение наклона с шагом в десять каналов, были отобраны четыре точки, значение наклона которых составляло от 0 до 1%. Их значения были нормализованы от нуля до единицы и использовались в качестве входных данных для нейронной сети.

M. R. Einian, S. M. R. Aghamiri и R. Ghaderi в качестве архитектуры сети и обучающего алгоритма были выбраны многослойная нейросеть прямого распространения и алгоритм обучения обратной связи Левенберга-Марквардта, которые характеризуются простотой и хорошей способностью к обобщению. Нейронная сеть имела четыре ввода, один скрытый слой и один выходной нейрон. На вводы подавались значения с оси ординат выбранных точек, вывод показывал отношение активностей  $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ . В качестве передаточной функции для нейронов скрытого слоя использовали сигмоидальную функцию гиперболического тангенса, для выходного нейрона – линейную функцию. Количество скрытых нейронов колебалось от 5 до 60 ввиду отсутствия какого-либо общего правила определения числа нейронов в скрытом слое. Для тестирования сети использовали две группы данных: первую из тридцати спектров урана техногенного происхождения и вторую из сорока пяти спектров урана природного происхождения. Проверка качества работы сети проведена по нескольким статистическим индексам: коэффициенту корреляции (используется для определения линейной зависимости предполагаемых и экспериментальных значений), средней абсолютной ошибке прогноза (для

оценки точности прогноза) и среднеквадратической ошибке (указывает на несоответствие между предполагаемыми и экспериментальными значениями).

В результате авторами делаются следующие выводы: во-первых, наиболее оптимальной производительностью обладает нейронная сеть с десятью скрытыми нейронами; во-вторых, сеть с вышеописанной архитектурой показала превосходные результаты для разделения проб урана антропогенного происхождения и естественного, что подтверждается статистическими индексами, в-третьих, метод нейронных сетей может быть использован для определения соотношения активностей радиоактивных изотопов, что найдет применение при проверке контроля качества, быстром скрининге и при проведении процедур классификации.

Стоит отметить, что проблему анализа отношений активностей можно отнести как к задачам классификации, так и к частному случаю задач количественного анализа.

### ***Количественное определение радиоактивных изотопов***

Последнему типу задач посвящены работы исследователей из Испании [13], Франции [14], России [15] и др. В работе египетского ученого М. Е. Medhat [16] рассмотрены проблемы не только качественного определения изотопов, но и оценки их активностей в источниках естественного происхождения.

Автор рекомендует использовать трехслойные модели искусственных нейронных сетей с одним скрытым слоем, при этом подчеркивая, что нет никаких теоретических обоснований использовать более двух скрытых слоев нейронов. В своей работе он уменьшил разрешение спектра гамма-излучения урана-238, тория-232 и калия-40 до двадцати четырех каналов и использовал эти данные для нейронов входа. Опытным путем подбирались число нейронов в скрытом слое – от одного до десяти, а также проводился поиск оптимального количества эпох при обучении.

В заключении М. Е. Medhat отмечает, что, во-первых, наилучшие результаты показала нейронная сеть с архитектурой, в которой число нейронов в скрытом слое равно восьми, во-вторых, оптимальное количество эпох для обучения составило двадцать тысяч, при превышении этого значения начинает расти среднеквадратическая ошибка, и, наконец, в-третьих, искусственная нейронная сеть показала хорошие результаты для определения активности перечисленных выше изотопов.

### ***Выводы***

Таким образом, использование искусственных нейронных сетей в обработке спектрометрической информации остается актуальной проблемой, решение которой позволит повысить эффективность и точность радиационных измерений. Основные задачи, которые успешно могут решать нейронные сети сводятся к следующим: оценка качества полученного спектра, качественный анализ (идентификация нуклидов, задачи классификации), анализ отношений активности изотопов (частный случай количественного анализа, задачи классификации), а также количественный анализ (определение удельной активности изотопов).

Из преимуществ нейронных сетей, по сравнению с классическими подходами можно отметить отсутствие потребности в сложной математической модели, ускорение обработки большого количества данных, исключении влияния человека на данном этапе. Множество общепринятых статистических критериев позволяют достоверно оценить качество работы сети.

Тем не менее, анализ литературных данных показал, что требуется более глубокая проработка следующих вопросов: работа сети с целым спектром, а не с отдельными пиками излучения, автоматизированный поиск зон интересов, использование на стадии обучения не модельных, а реальных спектров, работа с образцами различной природы. В частности, анализ биологических образцов более сложен ввиду большого количества органических веществ, которые могут быть не в полной мере отделены радиохимическим методом и оказывают влияние на качество получаемых спектров. Кроме того, совершенно не изучены способности нейронных сетей проводить анализ образцов со слабой активностью.

Однако, несмотря на перечень слабоизученных вопросов, применение искусственных нейронных сетей в обработке спектрометрической информации представляется возможным благодаря ряду несомненных преимуществ по сравнению с классическими подходами.

### ***Список литературы***

1. К вопросу о стандартизации и универсализации гамма-спектральных методов анализа / Ю. А. Зайцев // Спектрометрические методы анализа радиоактивного загрязнения почв и аэрозолей – 1974. – С. 8.
2. Artificial neural networks: fundamentals, computing, design and application / I. A. Basheer, M. Hajmeer // Journal of microbiological methods – 2000. – №. 43. – P. 3–31.

3. Nuclear Spectral Analysis via Artificial Neural Networks for Waste Handling / P. E. Keller, L. J. Kangas, G. L. Troyer, Sh. Hashem, R. T. Kouzes // IEEE Transactions on Nuclear Science –1995. – Vol. 42, № 4. – Pp. 709–715.
4. Application of neural networks for the analysis of gamma-ray spectra measured with a Ge spectrometer / E. Yoshidaa, K. Shizumaa, S. Endoa, T. Okab // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research – 2002. – Pp. 557–563.
5. Application of artificial neural networks for water quality prediction / A. Najah, A. El-Shafie, O. A. Karim, Amr H. El-Shafie // Neural Comput & Applic – 2013. – № 22. – Pp. 187–201.
6. Pengembangan spektrometer sinar-gamma dengan sistem identifikasi isotop radioaktif menggunakan metode jaringan syaraf tiruan / M. Syamsa Ardisasmita // Risalah Pertemuan Penelitian dan Pengembangan Aplikasi Isotop dan Radiasi – 2001. – Pp. 117–124.
7. Near-Infrared Spectroscopy and Neural Networks for Resin Identification / M. K. Alam, S. L. Stanton, G. A. Hebner // Spectroscopy – 1994. – Pp. 30–40.
8. Нейронная сеть для идентификации нуклидов по гамма-спектру / А. В. Кочергин, С. С. Пивоварцев // Искусственный интеллект – 2008. – № 4. – С. 600–604.
9. Difficulties in using  $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$  ratios to detected enriched or depleted uranium / R. L. Fleischer // Health Phys. – 2008. – № 94 (3). – Pp. 292–293.
10. The use of artificial neural networks in PVT-based radiation portal monitors / L. J. Kangas, P. E. Keller, Ed. R. Siciliano, R. T. Kouzes, J. H. Ely // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research – 2008. – Pp. 398–412.
11. Application of neural network method to detect type of uranium contamination by estimation of activity ratio in environmental alpha spectra / M. R. Einian, S. M. R. Aghamiri, R. Ghaderi // Journal of Environmental Radioactivity – 2016. – № 151. – Pp. 75–81.
12. Radio ecological survey at selected sited hit by depleted uranium ammunition during the 1999 Kosovo conflict / U. Sansone [et al.] // Sci. Total Environ. – 2001. – № 281. – Pp. 23–35.
13. A new approach to the analysis of alpha spectra based on neural network techniques / A. Baeza [et al.] // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. – 2011. – Pp. 450–453.
14. Application of neural networks to quantitative spectrometry analysis / V. Pilato, F. Tola, J. M. Martinez, M. Huver // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. –1999. – Pp. 423–427.
15. Преобразование спектров с использованием искусственных нейронных сетей / С.В. Малиновский, И. А. Каширин, В. А. Тихомиров // Проблемы прикладной спектрометрии и радиометрии – 2011. – С. 21.
16. Artificial intelligence methods applied for quantitative analysis of natural radioactive source / M. E. Medhat // Ann. Nucl. Energy – 2012. – № 45. – Pp. 73–79.

**R. K. Spirov, A. N. Nikitin**

## NEURAL NETWORKS IN SPECTROMETRY OF RADIOACTIVE RADIATIONS: THE PROBLEM CONDITION

*In article questions of application of artificial neural networks in spectrometry of radiations are considered. The review of a condition of a problem at the present stage is presented. In the conclusion advantages and lacks of application of neural networks of processing of the spectrometer information are brought.*