

# КОМП'ЮТЕРНІ ЗАСОБИ, МЕРЕЖІ ТА СИСТЕМИ

*M.I. Khodakovskiy*

## **INVESTIGATION OF SYNAPTICAL SYSTEMS OF MOLECULAR MEMORY AND ITS MICROPROCESSOR PROPERTIES FOR TRAINING**

*The work describes the study of synaptic systems of molecular memory and its microprocessor properties for training.*

*Key words: synaptic systems, neural networks, programming of synapses, training systems.*

*Розглянуто можливості використання мікропроцесорних властивостей синаптичних систем молекулярної пам'яті при навчанні. Ключові слова: синаптичні системи, програмування синапсів, нейронні мережі, навчальні системи.*

*Рассмотрены возможности использования микропроцессорных свойств синаптических систем молекулярной памяти при обучении.*

*Ключевые слова: синаптические системы, программирование синапсов, нейронные сети, обучающие системы.*

© Н.И. Ходаковский, 2012

УДК: 681.327

Н.И. ХОДАКОВСКИЙ

## **ИССЛЕДОВАНИЕ СИНАПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ МОЛЕКУЛЯРНОЙ ПАМЯТИ И ИХ МИКРОПРОЦЕССОРНЫХ СВОЙСТВ ПРИ ОБУЧЕНИИ**

**Вступление.** Создание молекулярной памяти включает изменения структуры компонентов нейрона, работу программ ДНК-го аппарата клетки, построение новых и активизацию существующих синаптических связей между нейронами, которые и являются основой памяти. Функционирование памяти также зависит от синхронизации работы тандема синапс-ядерно-ядрышковый аппарат клетки, выброса в цитоплазму нейрона биологически активных веществ и сопутствующего таким процессам обмена веществ клетки нейрона. Под памятью понимаются свойства живых систем фиксации, хранения, удаления и воспроизведения следов ранее принятых сигналов. В результате жизнедеятельности и обучения организм человека изменяется и иначе реагирует на повторение тех же сигналов, что и является наличием следов обучения в виде молекулярной памяти. При детальном анализе временных характеристик памяти используется более дробное деление на сенсорную или ультракороткую (период хранения менее одной секунды), первичную (несколько секунд), вторичную (от минут до нескольких лет) и третичную (информация хранится всю жизнь). Переход памяти из сенсорной и первичной в долговременную осуществляется через этапы преобразования и упорядочивания ее следов в виде энграмм.

**Постановка задачи.** Цель данной работы – изучение микропроцессорных свойств синаптических систем молекулярной памяти при обучении.

**Комплексный подход к определению механизмов молекулярной памяти.** Молекулярная память представляется свойством мозга как системы в целом, а не его отдельных молекулярных и клеточных компонентов. Для понимания составляющих механизма формирования памяти на молекулярном уровне рассмотрим принцип построения образа в мозгу в случае, когда мы берем в руку книгу.

Отраженный от книги свет фокусируется в глазу хрусталиком и поступает на сетчатку, где возникает изображение книги воспринимающееся соответствующими клетками. Сигнал из сетчатки передается в основные чувствительные передающие ядра головного мозга, расположенные в зрительном бугре таламуса, преимущественно в той части, которую называют латеральным колленчатым телом. Там активируются многочисленные нейроны, которые реагируют на распределение света и темноты. Аксоны нейронов латерального колленчатого тела идут к первичной зрительной коре, которые расположенные в затылочной доле больших полушарий. Импульсы из таламуса, что пришли в эту часть коры, преобразуются в ней в сложную последовательность разрядов корковых нейронов, одни из которых реагируют на границу между книгой и столом, другие – на углы в изображении книги и т. д. Из первичной зрительной коры информация по аксонам поступает в ассоциативную зрительную кору, где происходит распознавание образов, в данном случае книги. Распознавание в этой части коры основано на ранее накопленных знаниях о внешних очертаниях предметов.

Планирование движения руки с книгой происходит в коре лобных долей больших полушарий. В этой же области коры расположены двигательные нейроны, которые отдают команды мышцам руки и пальцев. Приближение руки к книге контролируется зрительной системой и интерорецепторами, воспринимающими положение мышц и суставов, информация от которых поступает в центральную нервную систему (ЦНС). Когда мы берем книгу в руку, рецепторы в кончиках пальцев, воспринимающие давление, сообщают, хорошо ли пальцы обхватили книгу и каким должно быть усилие, чтобы ее удержать. Если мы захотим открыть книгу, потребуются активация другой хранящейся в мозге информации, обеспечивающей это более сложное движение, а зрительный контроль будет способствовать повышению его точности.

На приведенном примере видно, что выполнение довольно простого действия вовлекает обширные области мозга, простирающиеся от коры до подкорковых отделов. При более сложных формах поведения, связанных с речью или мышлением, активируются другие нейронные цепи, охватывающие еще более обширные области мозга.

**Микропроцессорные возможности синаптических систем нейронной сети молекулярной памяти.** Рассмотрим микропроцессорные возможности синаптических систем. Каждый синапс содержит около 1000 молекулярных «переключателей» в виде аналоговых транзисторов и его можно сравнить с микропроцессором. В результате получается, что количество «транзисторов» в человеческом мозге нужно увеличить ещё на три порядка. А это значит, что их

больше, чем суммарное количество транзисторов всех компьютеров и маршрутизаторов на нашей планете.

Расчёт количества "транзисторов" в нашем мозге и наших компьютерах выглядит следующим образом. В нашем мозге  $1,25 \cdot 10^{14}$  синапсов, в каждом синапсе 1000 молекулярных переключателей. В результате получается, что в нашем мозге  $1,25 \cdot 10^{17}$  синапсов. С 2010 года в компьютерных микропроцессорах примерно  $10^9$  транзисторов. Если считать, что общее количество компьютеров в мире составляет  $10^9$  штук, то в результате получается, что во всех компьютерах нашей планеты  $10^{18}$  транзисторов. То есть сложность мозга человека сопоставима с мировой инфраструктурой средств информационных технологий [1, 2].

От нейрона к нейрону сигнал передаётся способом, который специалисту-схемотехнику трудно представить. Синапс представляет участок контакта двух нейронов в виде зазора шириной 20 нм, который ограничен пресинаптической мембраной клетки-передатчика и постсинаптической мембраной клетки-приёмника. Химический синапс представляет сложное электротехническое устройство с однонаправленностью передачи и способностью с одинаковой силой передавать сильный и слабый сигналы.

Синаптическая подкарта в виде синаптической системы, как и нейрон подобны электронному микропроцессору, поскольку он получает на свои входные дендриты тысячи сигналов и интегрирует всю входящую информацию. Однако в отличие от микропроцессора, обладающего множеством выходных контактов, нейрон имеет всего один выход в виде аксона. В итоге каждый нейрон может реагировать на входящие сигналы только по одному алгоритму: или послать сигнал следующему нейрону в цепи, разрядившись импульсом и направив его по своему аксону, или ничего не сделать. Синаптическая система из множества синапсов, в отличие от отдельного нейрона способна принимать и передавать множество сигналов.

Новые нейронные системы фиксируются при изменениях в межнейронных контактах – синапсах, в которых нервный импульс вызывает выделение специального химического вещества – медиатора, способного увеличить или затормозить генерацию импульса следующим нейроном. Долговременные изменения эффективности синапсов обусловлены изменениями в биосинтезе белков, от которых зависит чувствительность синаптической мембраны к медиатору. Установлено, что биосинтез белков активируется при возбуждении нейронов на разных уровнях организации ЦНС, а блокада синтеза нуклеиновых кислот или белков затрудняет или исключает формирование долговременной памяти [2]. Очевидно, что одна из функций активации синтеза при возбуждении – структурная фиксация нейронных систем, лежащая в основе долговременной памяти.

Проторение путей распространения возбуждения осуществляется за счет увеличения проводимости имеющихся синапсов или в результате получения дополнительных синапсов в виде межнейронных связей. Оба возможных механизма нуждаются в интенсификации белкового синтеза. Первый – сводится к

явлениям клеточной адаптации, и хорошо согласуется с представлением об универсальности основных биохимических систем клетки. Второй – требует направленного роста отростков нейронов и кодирования поведенческой информации в структуре химических агентов, управляющих таким ростом и заложенных в генетическом аппарате клетки.

Материальные носители формируют механизмы работы молекулярной памяти в виде следов обучения. Запись информации, которая хранится в ЦНС, осуществляется в виде энграммы. Хотя слово «запись» здесь весьма условно, потому что поступление и записывание информации в мозге существенно отличается от аналогичных процессов в ЭВМ, когда процесс накопления информации продолжается до тех пор, пока не прекращается внешний «ввод» или исчерпывается информационная емкость. В памяти человека откладывается лишь незначительная часть тех восприятий, которые поступают в ЦНС через органы чувств. Таким образом, мозг человека отбирает, сортирует и хранит лишь наиболее важную и общую информацию, поскольку память человека представляет собой селективный фильтр.

Другим важным свойством молекулярной памяти является способность хранения информации о прошедших событиях внешнего мира и об ответных реакциях организма на эти события путем построения модели текущего или будущего поведения.

Образование структур молекулярной памяти основано на фиксированной записи последовательностью событий. Долговременная память обеспечивает хранение информации практически на протяжении всей жизни и устойчива к воздействиям, нарушающим кратковременную память. Образование любого вида памяти характеризуется следующей последовательностью событий:

- сортировка и выделение новой информации;
- формирование энграммы;
- долговременное хранение значимой для организма информации;
- извлечение и воспроизведение хранимой информации.

Механизм получения энграммы содержит несколько этапов, при которых происходит фиксирование информационного отпечатка за счет изменения электрических свойств нейронов и проницаемости синаптических мембран с последующим включением ферментных систем и изменением нейронального метаболизма.

**Процессы запоминания в молекулярной памяти.** Основную роль носителя порций информации в клетке о конкретных событиях путем обработки соответствующих сигналов в синапсах, а также формирование структур памяти и передачу их содержимого в различные отделы клетки осуществляют молекулы рибонуклеиновой кислоты (РНК). Процесс запоминания сопровождается включением синтеза нуклеиновых кислот и белка. При этом синтезированные молекулы белка являются хранилищем информации о запоминаемых событиях.

Как показывают эксперименты [2], включение блоков долговременной памяти происходит через 10 минут. Этот процесс инициируется приходом информации в клетку и перестройкой биологических свойств нервной клетки.

Во время обучения в нервные клетки приходят волны сигналов, которые вызывают включение синтеза РНК и белка. Это может приводить либо к установлению новых синапсов между новыми группами клеток, либо к перестройке существующих синапсов.

«Запись» каждого события, осуществленная на синаптических структурах, затем распределяется по обширным зонам мозга, поскольку суммарная информация о разных событиях отражается не в возбуждении разных нейронов, а в различных комбинациях возбуждённых участков и клеток мозга.

Особым фильтром для молекулярных структур памяти является гиппокамп, который как молекулярное «сито», пропускает важные события в долговременную память. Гиппокамп представляет собой подкорковое хранилище памяти, входящее в состав лимбической системы. В обычных условиях гиппокамп обеспечивает перенос информации о происходящем в данный момент события в соответствующее хранилище, а затем переводит её из кратковременной памяти в долговременную. Его пирамидальные нейроны способны к интеграции и дифференцированному управлению сигналами, поступающими по разным входам. Необходимо подчеркнуть, что гиппокамп – это аппарат для устранения ошибок при обучении.

Система памяти устроена иерархично, логично, предусмотрительно и содержит центральные фигуры в виде гиппокампа, ретикулярной формации и миндаины. Таким образом, можно определить следующую картину памяти. Большой лимбический круг в виде гиппокампо-сингулярной системы – это цикл «информационный». Его структуры принимают сенсорную информацию из различных источников и последовательно обрабатывают её на разных уровнях сложности. Второй, гиппокампо-ретикулярный цикл является регуляторным. В рамках этого цикла система объединяет структуры, регулирующие рабочий уровень мозга.

Нервный импульс поступает в отросток пресинаптического нейрона – аксон, где он стимулирует выброс сигнальных молекул, которые затем связываются с рецепторами отростка постсинаптического нейрона – дендритом. Это, в свою очередь, активизирует ферменты – киназы, подобно тому, как цифровая информация наносится на поверхность компакт-диска. В нашем случае это формирование поверхности синапса [3].

Передача информации в мозгу, как и нервной системе в целом, осуществляется посредством нервных импульсов. Они распространяются в направлении от тела клетки нейрона к концевому отделу аксона, который может ветвиться, образуя множество окончаний, контактирующих с другими нейронами через контактную площадку – синапс. При этом передача импульсов через синапс опосредована химическими веществами – нейромедиаторами.

Нервный импульс может зарождаться и в дендритах – тонких ветвящихся отростках нейрона, специализирующихся на получении информации от других нейронов и передаче ее телу нейрона. На дендритах и, в меньшем числе, на теле клетки имеются тысячи синапсов; именно через синапсы аксон, несущий ин-

формацию от тела нейрона, передает ее дендритам других нейронов.

Память как психический процесс связана с работой целостного мозга, где в системе каждого анализатора происходит фиксация информации [4].

Схема запуска формирования молекулярной памяти как психического процесса на программном уровне с обратной связью в системе ДНК нейрона – синапс приведена в таблице.

ТАБЛИЦА

Вид химико-психологического процесса	Этапы формирования молекулярной памяти
Запуск схемы формирования молекулярной памяти как психического процесса на программном уровне с обратной связью в системе ДНК нейрона – синапс	Мысленная установка на запоминание
	Сигнал проходит обработку «на запись» в информационной системе только при «разрешении» со стороны регуляторной системы
	Выделение ассоциативной метки для фиксации конкретной информации
	Прохождение большого лимбического круга в виде гиппокампо-сингулярной системы составляет «информационный» цикл Его структуры принимают различную сенсорную информацию из различных источников и последовательно обрабатывают её на разных уровнях сложности
	Прохождение второго круга в виде гиппокампо-ретикулярной системы составляет регуляторный цикл
Прохождение «эмоциональной» системы (амигдала – гипоталамус), которая за счёт нервных и вегетативно-гормональных влияний, возникающих при эмоциях, может усиливать и продлевать возбуждение регуляторной системы, что очень важно при обучении	

С рецепторами на дендритах в полупроницаемой постсинаптической мембране соединены каналы, контролирующие движение ионов через мембрану. В покое нейрон обладает электрическим потенциалом в 70 милливольт (потенциал покоя), при этом внутренняя сторона мембраны заряжена отрицательно по отношению к наружной. Хотя существуют различные медиаторы, все они оказывают на постсинаптический нейрон либо усиливающее, либо тормозное действие.

**Необходимость ситуации субъективной новизны для изменений мозга при обучении.** Для закрепления навыков при обучении в течение нескольких дней происходит формирование нейронной сети в виде процесса "закрепления нового", после чего процесс может продолжаться, поскольку при обучении сети нейронов растут. И это – необратимый процесс. Каждый эпизод изменяет наш мозг, не позволяя вернуть его в предыдущее состояние.

Дальнейшие процессы запоминания используют особенности различных типов памяти. За такие типы отвечают разные участки мозга. Так, сознательная (эпизодическая/психологическая) память связана с сознанием и находится в гиппокампе. О информации в ней мы можем что-то сказать словами или как-то описать. Память навыков (процедурная) способствует нахождению путей в лабиринтах (ориентация в пространстве), вождению автомобиля, рисованию изображения в зеркале.

Для процессов воспроизведения (реактивации) памяти необходима её реструктуризация. Это означает, что когда мы что-то вспоминаем, то соотносим все это со своим опытом. Например, при сериальном воспроизведении (дается картинка, которая несколько раз вспоминается и, в результате, последняя картинка может быть совсем не похожа на первоначальную). Соответственно при воспроизведении происходит реконсолидация [5].

Если кто-то вспоминает что-то, и при этом блокирован или нарушен процесс запоминания, то у него забывается исходная информация – остается  $\approx 40\%$  при полной блокировке. Консолидация и реконсолидация очень разные сами по себе – зависят от разных белков, разных клеточных каскадов, различных временных периодов и характеристик. После консолидации во сне память более категоризована (происходит закрепление памяти).

Выполнив свою задачу, белки распадаются, а на смену им поступают другие, согласно инструкциям тех или иных генов. И если только упомянутое „вспоминание“ не запечатлено в генах (программных инструкциях), то новые белки, в отличие от распавшихся, уже не будут их содержать.

Запоминание чего-либо состоит в том, что в мозгу образуется какой-то эквивалент полученного внешнего воздействия (будь то образ, переживание, звук или понятие). Можно считать, что каждое воздействие на мозг запечатлевается в виде определённого изменения неких белков, которые содержатся в нервных клетках – нейронах.

**Вычисление нейроном общего эффекта синаптической активности как функции времени.** Функция нейрона состоит в интеграции всех воздействий, воспринимаемых через синапсы на теле нейрона и дендритах. Назначение нейрона состоит в интеграции всех воздействий, приходящих через синапсы на его теле и дендритах. Поскольку эти влияния могут быть возбуждающими или тормозными и не совпадать по времени, нейрон должен исчислять общий эффект синаптической активности как функцию времени. Если возбуждающее действие преобладает над тормозным и деполяризация мембраны превышает пороговую величину, происходит активация определенной части мембраны нейрона – в области основания его аксона (аксонного бугорка). Здесь в результате открытия каналов для ионов натрия и калия возникает потенциал действия (нервный импульс).

Такой потенциал распространяется далее по аксону к его окончанию со скоростью от 0,1 м/с до 100 м/с (чем толще аксон, тем выше скорость проведения). При достижении потенциалом действия окончания аксона активируется

еще один тип ионных каналов, который зависит от разности потенциалов в виде кальциевых каналов [6]. По ним кальций входит внутрь аксона, что приводит к мобилизации пузырьков с нейромедиаторами, которые приближаются к пресинаптической мембране, сливаются с ней и выпускают нейромедиатор в синапс.

**Формирования памяти в синантических системах нейронных сетей.**

Сигнал в нейронной сети проходит по определенному пути, зажигает по дороге все пройденные им нейроны и на карте мозга вспыхнет след этого пробега. Каждый такой след есть мозговой эквивалент того воздействия (образа, звука, переживания или понятия), которое породило первичный сигнал [7].

Процесс придания следу в нейронной сети статуса воспоминания, т. е. получения возможности снова вызвать в сознании эту информацию, заключается в „записи“ этого следа с помощью синапсов – промежутков между точками соединения двух разных нейронов. При каждом прохождении данного сигнала по своей системе нейронов те и только те синапсы, которые соединяют эти нейроны в единый „след“, становятся проводимыми.

Многочисленное прохождение одного и того же сигнала в виде приказа-мысли создаёт на карте мозга небольшую „подкарту“ изменённых синапсов. Совокупность таких „подкарт“ образует нашу память.

„Волевой импульс“, вызывающий воспоминание, зажигает несколько первых нейронов данной подкарты, а дальше сигнал уже „сам собой“ бежит по самому лёгкому пути, т. е. через более проводящие синапсы, зажигая всю „подкарту“. Это подобно системе E-mail, когда стоит написать несколько первых букв электронного адреса какого-нибудь адресата, как появляется весь этот адрес. Наше уникальное „Я“ – это наша уникальная память, оно складывается из всех наших „воспоминаний“ в самом широком смысле этого слова, и потому совокупность всех таких синаптических „подкарт“ можно назвать нашим „синаптическим Я“.

Для формирования воспоминаний требуются электрохимические сигналы от удалённых участков клетки, чтобы активировать гены в клеточном ядре, а затем гены направляют свой ответ обратно в отростки клетки. Для принятия главного решения, нейрон принимает решение о сохранении следов сигнала только в том случае, если его важность была подтверждена. В синапсе, который получил достаточную стимуляцию, вырабатываются молекулы сигнального вещества в виде транскрипционного фактора CREB. После того как эффективность синапса повысилась, оно может поддерживать память ещё в течение некоторого времени, пока сигнальная молекула находится на пути к ядру нервной клетки. Там она активирует определённые гены, необходимые для синтеза белков, которые усилят синаптическую связь на длительное время. Однако здесь необходимо решить вопрос: каким образом белок, синтезированный в теле нейрона, сможет отыскать среди тысяч синапсов именно тот, который его затребовал [8].

Поскольку информация в нервной системе кодируется паттерном импульсов нейронной активности в мозге, определённые гены в нервных клетках включаются и выключаются в зависимости от характера импульсного разряда. Харак-



тер изменений электрического потенциала, происходящих на поверхности клетки, управляет генами, расположенными в ядре нейрона за счет временного кодирования.

Транскрипционные факторы CREB – это управляющие белки, которые содержатся в клеточном ядре и отыскивают конкретные последовательности ДНК и связываются с ними. Фактически они являются выключателями, управляющими транскрипцией генов. Поэтому активация CREB в нейроне ведёт к активации генов, что приводит к получению белков, усиливающих структуру синапса и превращающих кратковременную память в долговременную.

В [9] было показано, что белковым структурам памяти не требуется адресации в определённых синапсах. Сигналы-адреса распространяются по всей поверхности клетки, но оказывают влияние только на те синапсы, которые претерпели временное повышение своей эффективности и поэтому повышают мощность структур таких синапсов на длительное время. В существующем множестве пересекающихся биохимических путей, передающих сигнал через многочисленные перекрёстки от клеточной мембраны вглубь клетки, электрические сигналы, идущие с различной частотой по клеточной мембране, находят свою дорогу через цитоплазму к конечному пункту – ядру.

**Выводы.** Синаптические системы в нейронных сетях представлены синаптическими подкартами, способными принимать, хранить, сортировать, удалять и воспроизводить полученную информацию посредством выполнения генетических программ на построение молекулярных структур памяти подобно специализированным микропроцессорным системам.

Процессы воспоминания для получения возможности снова вызвать в сознании нужную информацию заключаются в „записи“ следа сигнала в нейронных сетях с помощью синапсов – промежутков между точками соединения двух разных нейронов. При каждом прохождении данного сигнала по своей системе нейронов те и только те синапсы, которые соединяют эти нейроны в единый „след“, становятся проводимыми.

Наличие большого числа прохождений одного и того же сигнала в виде мысли-инструкции создаёт на карте мозга небольшую „подкарту“ изменённых синапсов. Совокупность таких „подкарт“ образует нашу память. Мысленный импульс, вызывающий воспоминание, зажигает несколько первых нейронов данной подкарты, а затем сигнал уже „сам собой“ бежит по самому лёгкому пути, то есть через более проводящие синапсы, зажигая всю „подкарту“.

Наше личное „Я“ – это прежде всего наша уникальная память, оно складывается из всех наших воспоминаний и потому совокупность всех таких синаптических „подкарт“ можно назвать нашим „синаптическим Я“.

Формирование воспоминаний требует наличия электрохимических сигналов от удалённых участков клетки, чтобы активировать гены в клеточном ядре, а затем гены направляют свой ответ обратно в синаптические системы нейрона. Для принятия главного решения, нейрон принимает решение о сохранении полученной подкарты синаптических систем в том случае, если ее важность была

подтверждена.

В синапсе, получившем достаточную стимуляцию, вырабатываются молекулы сигнального вещества, которое поддерживает память в течение некоторого времени на пути нахождения к ядру нервной клетки, где оно запускает гены усиления синаптической связи на длительное время.

Поскольку информация в нервной системе кодируется паттерном импульсов нейронной активности, определённые гены в нервных клетках включаются и выключаются в зависимости от характера импульсного разряда. Характер изменений электрического потенциала, происходящих на поверхности клетки, управляет генами, расположенными в ядре нейрона путем временного кодирования.

1. *Ходаковский Н.И.* Исследование процессов молекулярного кодирования нейронных сетей при обучении // Комп'ютерні засоби, мережі та системи. – 2011. – № 10. – С. 30 – 39.
2. *Анохин К.В.* Молекулярные сценарии консолидации долговременной памяти // ЖВНД, 1997. – Т. 47, вып. 2. – С. 261 – 279.
3. *Bailey C.H., Kandel E.R., Si K.* The persistence of long-term memory: a molecular approach to self-sustaining changes in learning-induced synaptic growth // *Neuron*. – 1994. – Т. 44. – P. 49 – 57.
4. *Sowa J.F.* *Conceptual Structures: Information Processing in Mind and Machine.* Addison-Wesley. – Massachusetts. – 1984. – 346 p.
5. *Молекулярные структуры: Прецизионные методы исследования /* Под ред. А. Доменикано, И. Харгиттаи. – М.: Мир, 1997. – 671 с.
6. *Зоркий П.М., Лубнина И.Е.* Супрамолекулярная химия: возникновение, развитие, перспективы // *Вестн. МГУ*, сер. 2, 1999. – Т. 40, № 5. – С. 300.
7. *Боголюбов Н.И., Ширков Д.В.* Введение в теорию квантовых полей. – М.: Наука, 2008. – 736 с.
8. *Wada Y., Uda T., Lutwyche M., Kondo S., Heike S.* A proposal of nanoscale devices based on atom/molecule switching // *J. Appl. Phys.* – 1996. – Vol. 74. – P. 7321–7328.
9. *Fields D., Itoh K.* Neural cell adhesion molecules in activity-dependent development and synaptic plasticity // *Trends in Neurosciences*. – 1996. – Vol. 19.– issue 11. – P. 473 – 480.

Получено 01.10.2012