

*ИСКУССТВЕННЫЕ ИММУННЫЕ СИСТЕМЫ:  
ОБЗОР И СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ*

**Н.В. КУШНИР, А.В. КУШНИР, Е.В. АНАЦКАЯ, П.А. КАТЫШЕВА, К.Г. УСТИНОВ**

*Кубанский государственный технологический университет,  
350072, Российская Федерация, г. Краснодар, ул. Московская, 2;  
электронная почта: kushnir.06@mail.ru*

Решение задач оптимизации является одной из основных сфер применения различных эвристических алгоритмов, вдохновленных как живой, так и неживой природой. В данной статье произведен обзор современного состояния, относительно нового класса, биоинспирированных алгоритмов – искусственных иммунных систем. Рассматриваются их проблемы, недостатки и преимущества, актуальные разработки в области искусственных иммунных систем. Искусственные иммунные системы вызывают все больший интерес, обусловленный тем, что вобрали в себя лучшие особенности биоинспирированных методов, такие как динамическое расположение элементов из эволюционных алгоритмов и принципы обучения из искусственных нейронных сетей. Так, если иммунные сети относятся к числу самых первых моделируемых процессов из иммуноинспирированных исследований, то теорию опасности и моделирование процессов соматической гипермутации, отбора можно считать довольно молодыми сферами исследований. Однако и иммунные сети сегодня актуальны: они используются как ключевые узлы в гибридных биоинспирированных системах. Различные имплементации таких систем находят новые сферы применения в науке и промышленности.

**Ключевые слова:** иммунная система, теория клонального отбора, алгоритм негативного отбора

Актуальность исследования. Естественная иммунная система состоит из нескольких подсистем, каждая из которых отвечает за выполнение определенных функций. Главная же функция самой иммунной системы в целом – многоуровневая защита против внешних антигенов, основывающаяся на действии врожденных и приобретенных защитных механизмов.

Иммунная система представляет большой интерес для специалистов в области информатики, так как она является примером мощных и гибких возможностей децентрализованной обработки информации. По сути, она выполняет большой объем сложных параллельных вычислений. При этом иммунная система является примером биологической системы с превосходными адаптивными механизмами на локальном уровне и эмерджентных механизмов поведения на глобальном уровне. В настоящее время иммунные алгоритмы

разрабатываются для решения множества задач в широкой области приложений, таких как задачи оптимизации, задачи распознавания образов и т.д.

**Проблема исследования.** В соответствии с известными нам литературными данными, в настоящее время наибольшей популярностью из подходов, использующих иммунные алгоритмы, являются алгоритмы, применяющие механизмы отрицательного отбора, клонального отбора и модели иммунных сетей для решения задач автоматической генерации и настройки архитектуры нейронных сетей; в приложениях, ориентированных на прогнозы, защиты информации.

**Введение.** **Искусственная иммунная система (ИИС)** – адаптивная вычислительная система, использующая модели, принципы, механизмы и функции, описанные в теоретической иммунологии, которые применяются для решения прикладных задач.

В искусственной иммунной системе в качестве описания взаимодействия компонентов системы (антител) используются меры аффинности, а в качестве механизмов адаптации – иммунные алгоритмы. Чтобы построить такую систему, необходимо знать область применения или целевую функцию.

**Аффинность** – термодинамическая характеристика, количественно описывающая силу взаимодействия антигена и антитела. Применительно к искусственным иммунным системам аффинность – это характеристика, оценивающая степень близости (схожести) генетических наборов антигена и антитела. Для искусственных иммунных систем, основанных на бинарном коде, аффинность оценивается с помощью расстояния Хэмминга. Для систем, основанных на вещественном коде – с помощью евклидова расстояния.

**Популяция антител** – множество возможных решений задачи.

**Эпоха эволюции** – один такт цикла клональной селекции и созревания аффинности в ходе работы алгоритма искусственной иммунной системы.

**Клональная селекция** – процесс клонирования и мутации копий антитела в случайных позициях в ходе работы алгоритма искусственной иммунной системы.

Искусственные иммунные системы могут использоваться для решения разнообразных прикладных задач:

- обеспечение компьютерной безопасности;
- обнаружение аномалий во временных рядах данных;
- распознавание образов;
- многомерная многоэкстремальная оптимизация.

Общие методы основаны на конкретных иммунологических теориях, которые объясняют функции и поведение адаптивной иммунной системы млекопитающих:

*1. Клональный алгоритм отбора* – класс алгоритмов, основанных на теории клоновой селекции приобретённого иммунитета, которая объясняет, как В- и Т-лимфоциты улучшают их реакцию на антигены с течением времени, что называется *affinity maturation*. Эти алгоритмы сосредоточены на атрибутах теории Дарвина, где выбор основан на близости взаимодействия антигенов и антител и репродукции на принципе деления клеток и вариациях на основе соматических гипермутаций.

*2. Негативный алгоритм отбора.*

*3. Иммунный сетевой алгоритм.*

*4. Дендритный алгоритм.*

**Теория клонового отбора.** Теория клоновой селекции используется с тем, чтобы объяснить, как иммунная система «борется» против чужеродных антигенов. Когда бактерия проникает в наш организм, она начинает размножаться и поражать своими токсинами клетки организма. Была предложена одна из теорий, которая описывает, как иммунная система справляется с этими чужеродными антигенами. Те клетки, которые способны распознать чужеродный антиген, размножаются асексуальным способом, пропорционально степени их распознавания: чем лучше распознавание антигена, тем больше количества потомства (клонов) было сгенерировано [3].

В течение процесса репродукции клетки отдельные клетки подвергаются мутации, которая позволяет им иметь более высокое соответствие (аффинность) к распознаваемому антигену: чем выше аффинность родительской клетки, тем в меньшей степени они подвергаются мутации, и наоборот. Обучение в иммунной системе обеспечивается увеличением относительного размера популяции и

аффинности тех лимфоцитов, которые доказали свою ценность при распознавании представленного антигена. Основными иммунными механизмами при разработке алгоритма являются обработка определенного множества антител из набора клеток памяти, удаление антител с низкой аффинностью, созревание аффинности и повторный отбор клонов пропорционально их аффинности к антигенам.

Обобщённый алгоритм клонального отбора показан на рисунке 1.

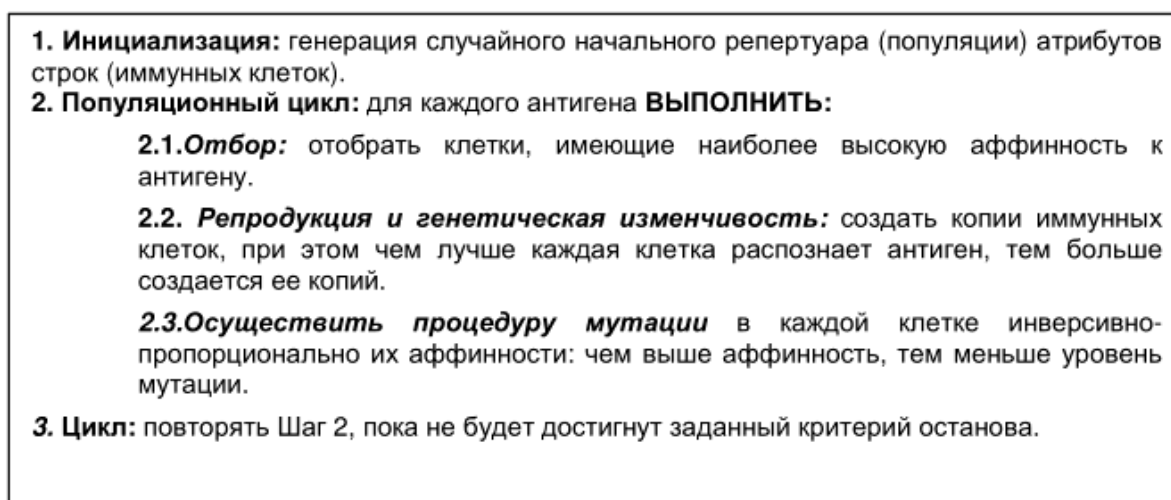


Рис. 1 – Обобщённый алгоритм клонального отбора

Формально клональный алгоритм можно представить следующим образом (1):

$$CLONALG = (Ab^0, Ag, L, N, n, \beta, d, \varepsilon), \quad (1)$$

где:

$Ab^0$  – исходная популяция антител;

$Ag$  – популяция антигенов;

$N$  – количество антител в популяции;

$L$  – длина рецептора антитела;

$n$  – количество антител, отбираемых для клонирования (с самой высокой аффинностью\*);

$\beta$  – множительный фактор, регулирующий количество клонов отобранных антител;

$d$  - количество антител, подлежащих замене новыми (т.е. имеющие самую низкую аффинность);

$E$  – критерий останова.

В клональном алгоритме, при решении той или иной задачи, можно использовать различные способы представления операторов, вычисление аффинности, параметров (сюда относят размер популяции, вероятности применения операторов гипермутации и замещения, количество итераций, условия останова работы клонального алгоритма). Кроме того, они обладают универсальностью в решении различных видов задач, упрощают нахождение их решения, а также позволяют полностью автоматизировать процесс поиска оптимума. Таким образом, клональный алгоритм работает с совокупностью “антител” (наборов решений) - популяцией, каждая из которых представляет возможное решение данной задачи. Каждое из антител оценивается мерой пригодности согласно тому, насколько “хорошо” соответствующее ей решение задачи. Наиболее подходящие антитела получают возможность “воспроизводить” потомство с помощью гипермутации. Это приводит к появлению новых антител, которые в процессе гипермутации улучшают своё соответствие целевой функции. Антитела с наименьшей аффинностью замещаются случайно сгенерированными антителами, равномерно распределенными по всей области определения целевой функции, что позволяет не замыкаться на локальных экстремумах, а исследовать всю целевую функцию. Таким образом, происходит итеративный процесс воспроизведения новых популяций из лучших представителей предыдущего поколения. Каждое новое поколение содержит более высокое соотношение характеристик, которыми обладают лучшие члены предыдущих поколений.

**Алгоритм негативного отбора.** Главным принципом действия человеческой иммунной системы является сравнение определенных «шаблонов» с находящимися внутри организма телами и выявление таким образом инородных тел. «Шаблонами» являются лимфоциты, постоянно генерируемые спинным мозгом и тимусом с учетом информации, содержащейся в ДНК. Такая информация накапливается перманентным образом, и этот процесс называется эволюцией

генной библиотеки. Лимфоциты разносятся по организму через лимфатические узлы, причем каждый тип лимфоцита отвечает за обнаружение какого-то ограниченного числа инородных тел. При генерировании лимфоцитов используется алгоритм отрицательного отбора. Проводится своеобразный тест на обнаружение лимфоцитом родных клеток организма: если подобное оно имеет место, «зародышевый» лимфоцит уничтожается, ведь в противном случае он будет бороться с собственными клетками. Иными словами, благодаря негативной селекции создаются «шаблоны», соответствующие телам, которые внутри организма отсутствуют, и, если какое-то тело подходит под данный шаблон, значит, оно явно чужое. Если лимфоцит начинает бороться с собственными клетками, то у человека происходит аутоиммунная реакция и организм начинает уничтожать сам себя. В случае обнаружения лимфоцитами инородного тела на основании соответствующего шаблона вырабатываются антитела, которые и уничтожают его. Здесь задействуется еще один процесс – клональная селекция, во время которой происходит своеобразный естественный отбор антител: выживают лишь те, которые максимально подходят под найденное инородное тело. При этом сведения о сгенерированных антителах «заносятся» в упоминавшуюся выше генную библиотеку. Таким образом, генная база данных содержит только ту информацию, которая лучше всего позволяет бороться с угрозой [4].

Выделим необходимые нам основные особенности иммунной системы человека:

1. Распределённость – у иммунной системы нет координирующих узлов.
2. Самоорганизация – происходит постоянное расширение генной библиотеки, адаптация процесса репродукции лимфоцитов в зависимости от внешних факторов.
3. Высокая степень параллелизма – компоненты иммунной системы работают самостоятельно и параллельно друг другу.

Аналогичная система защиты распределенных вычислений, основанная на искусственной иммунной системе, представляется весьма подходящим решением для противодействия вредоносному коду в среде, объединяющей географически

распределенные и не имеющие единого владельца ресурсы. Рассмотрим общий принцип работы системы защиты среды распределенных вычислений на основе искусственных иммунных систем. Каждый вычислительный узел распределенной сети содержит базу данных, хранящую «шаблоны» вредоносных объектов и «шаблоны» вероятных чужеродных объектов. Эта база является распределенной, на каждом узле хранится только часть «шаблонов» вероятных чужеродных объектов, причем периодически производится обмен этими «шаблонами» между узлами. При обнаружении вредоносного программного обеспечения сработавший «шаблон» копируется в базы всех узлов [1].

Принципиальная схема работы такой системы представлена на рисунке 2.

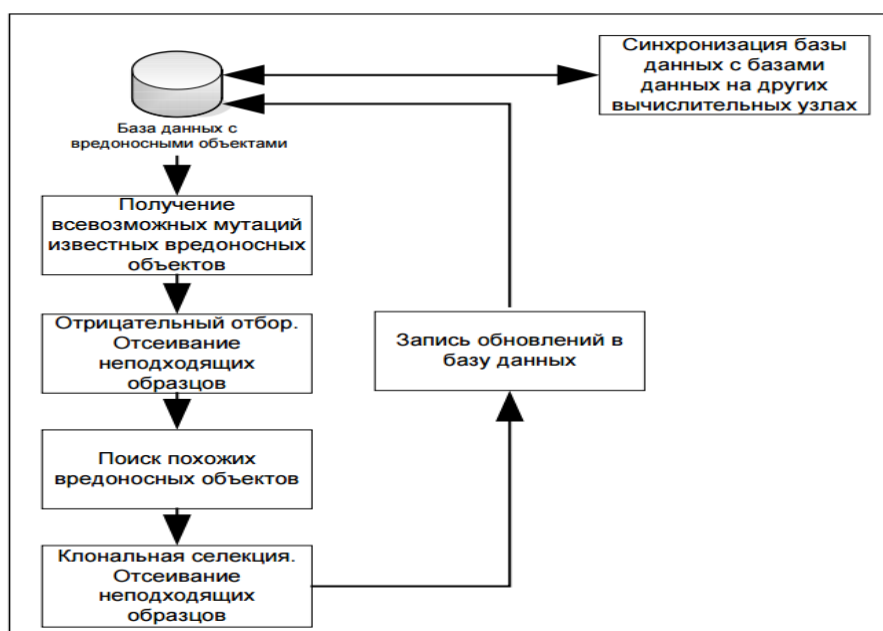


Рис. 2 – Принципиальная схема работы системы защиты среды распределенных вычислений

При обнаружении какого-либо инородного тела, оно изолируется в среде, где происходит его изучение. На примере вирусов – это модификация одного и того же вируса. Этот процесс позволяет понять принципы защиты не только от найденного объекта, но и от его производных. После этого производится отрицательный отбор, в процессе которого отсеиваются неподходящие образцы антител. Отрицательный отбор необходим для того, чтобы система защиты не реагировала на защищаемую систему как на вредоносный объект (аутоиммунная реакция). Далее новые антитела

осуществляют поиск вредоносных объектов в системе. В случае обнаружения происходит процесс клональной селекции и запись полученных данных в базу.

**Иммунный сетевой алгоритм.** Иммунные сетевые алгоритмы используют структуру сетевого графа, где узлы – это продуцируемые антитела, а в ходе алгоритма обучения расстояние между ними растет или сокращается в зависимости от степени их условной «близости». Такая структура метода позволяет использовать его для решения задач кластеризации, визуализации данных и даже для разработки искусственных нейронных сетей [2].

**Дендритные алгоритмы.** Дендритные алгоритмы основаны на модели дендритной клетки – одного из видов иммунокомпетентных клеток.

Дендритные клетки – это гетерогенная популяция антигенпрезентирующих клеток костномозгового происхождения.

Морфологически дендритные клетки — крупные клетки (15-20 мкм) круглой, овальной или полигональной формы с эксцентрически расположенным ядром, многочисленными разветвлёнными отростками мембраны.

Основной функцией дендритных клеток является презентация антигенов Т-клеткам. Дендритные клетки также выполняют важные иммунорегуляторные функции, такие как контроль над дифференцировкой Т-лимфоцитов, регуляция активации и супрессии иммунного ответа. Важной особенностью дендритных клеток является способность захватывать из окружающей среды различные антигены при помощи пиноцитоза и рецептор-опосредованного эндоцитоза. Больше всего дендритных клеток находится в тканях, которые соприкасаются с внешней средой, например, в толще эпителиального слоя слизистой оболочки кишечника, в подслизистой респираторного, желудочно-кишечного и урогенитального трактов. Дендритные клетки поглощают антигены, процессируют и представляют на своей поверхности в комплексе с МНС I или МНС II классов. Только в таком виде Т-клетки способны распознать антиген и вслед за этим активироваться, и развить иммунный ответ.

**Заключение.** Таким образом, изучение этих процессов позволяет понять новые принципы отслеживания и защиты системы от чужеродных и



нежелательных объектов. На принципах такого рода отслеживания чужеродных антигенов в живом организме возможна реализация алгоритмов отслеживания и защиты компьютерных систем от разного рода вредоносного программного обеспечения.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Бардачев Ю.Н., Дидык А.А. Использование положений теории опасности в искусственных иммунных системах // Автоматика, автоматизация, электротехнические комплексы и системы. 2007. № 2. С. 107–111.

2. Брюховецкий А.А., Скатков А.В. Применение моделей искусственных иммунных систем для решения задач многомерной оптимизации // Оптимізація виробничих процесів. 2010. № 7. С. 119–122.

3. Самигулина Г.А. Разработка интеллектуальных экспертных систем прогнозирования и управления на основе искусственных иммунных систем // Теоретическая информатика. 2009. Вып. 4. С. 15–22.

4. Станкевич Л.А., Казанский А.Б. Иммунологическая система обеспечения безопасности гуманоидного робота // Актуальные проблемы защиты и безопасности: тр. 9-й Всерос. науч.-практич. конф. 2006. № 5. С. 145–152.

#### REFERENCES

1. Bardachev Ju.N., Didyk A.A. Ispol'zovanie polozhenij teorii opasnosti v iskusstvennyh immunnyh sistemah // Avtomatika, avtomatizacija, jelektrotehnicieskie komplekxy i sistemy. 2007. № 2. S. 107–111.

2. Brjuhoveckij A.A., Skatkov A.V. Primenenie modelej iskusstvennyh immunnyh sistem dlja reshenija zadach mnogomernoj optimizacii // Optimizacija virobnichih procesiv. 2010. № 7. S. 119–122.

3. Samigulina G.A. Razrabotka intellektual'nyh jekspertnyh sistem prognozirovanija i upravlenija na osnove iskusstvennyh immunnyh sistem // Teoreticheskaja informatika. 2009. Vyp. 4. S. 15–22.

4. Stankevich L.A., Kazanskij A.B. Immunologicheskaja sistema obespechenija bezopasnosti gumanoidnogo robota // Aktual'nye problemy zashhity i bezopasnosti: tr. 9-j Vseros. nauch.-praktich. konf. 2006. № 5. S. 145–152.

*ARTIFICIAL IMMUNE SYSTEMS: REVIEW AND CURRENT STATE***N.V. KUSHNIR, A.V. KUSHNIR, E.V. ANATSKAYA, P.A. KATYSHEVA, K.G. USTINOV**

*Kuban State Technological University,  
2, Moskovskaya st., Krasnodar, Russian Federation, 350072,  
e-mail: kushnir.06@mail.ru*

Solving optimization problems is one of the most relevant spheres of heuristic algorithms application, inspired by live or inanimate nature. This article summarizes the current state of relatively new class of bioinspired algorithms that are artificial immune systems, with their issues, pros and cons. The authors are review developments of artificial immune systems, as well as researches of immune networks, immune response, somatic hypermutation, danger theory and selection processes. Artificial immune systems attract more and more interest due to the best of available properties among bioinspired methods such as dynamic location of working elements (from evolutionary algorithms) and learning principles (from artificial neural networks). If immune networking is one of the earliest model-based processes among immune inspired researches, then danger theory and modeling of somatic hypermutation and selection can be considered relatively young research areas. However, immune networks are still pressing problem today: they are used as a key parts of bioinspired hybrid systems. Different implemetations of these systems can be applied in many science researches and industries.

**Key words:** the immune system, the theory of clonal selection, negative selection algorithm