

**СТРАТИФИЦИРОВАННАЯ ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ  
АНТАГОНИСТИЧЕСКОГО КОНФЛИКТА  
В ВОЗДУШНО-КОСМИЧЕСКОЙ СФЕРЕ**

**STRATIFIED SIMULATION MODEL OF ANTAGONISTIC CONFLICT  
IN THE AIR AND SPACE SPHERE**

*По представлению академика РАРАН А.А. Рахманова*

**М.Т. Балдычев<sup>1</sup>, А.М. Казанцев<sup>2</sup>, Д.М. Петроченков<sup>3</sup>, А.В. Тимошенко<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Военный ордена Жукова университет радиозлектроники, <sup>2</sup>Московский авиационный институт,  
<sup>3</sup>Ярославское высшее военное училище противовоздушной обороны

**M.T. Baldytchev, A.M. Kazantsev, D.M. Petrochenkov, A.V. Timoshenko**

Статья посвящена развитию методов моделирования антагонистических конфликтов в воздушно-космической сфере. На основе метода динамики средних проведен анализ потенциальных возможностей модели Осипова – Ланчестера для решения задачи управления составом и характеристиками группировки разведывательно-информационных комплексов. Представлен вариант построения стратифицированной имитационной модели антагонистического конфликта, позволяющей повысить точность оценки текущих характеристик данной группировки за счет возможности динамической корректировки коэффициентов в модели верхней страты — модели Осипова – Ланчестера. **Ключевые слова:** вооруженный конфликт, моделирование, дифференциальные уравнения Осипова – Ланчестера, агентно-ориентированный подход, стратифицированные имитационные модели.

The article is devoted to the development of methods for modeling antagonistic conflicts in the aerospace sphere. On the basis of the method of dynamics of averages the potential capabilities of the Osipov – Lanchester model for solving the problem of managing the composition and characteristics of the grouping of reconnaissance and information complexes are analyzed. A variant of construction of a stratified simulation model of antagonistic conflict is presented, which allows increasing the accuracy of estimation of current characteristics of this grouping due to the possibility of dynamic correction of coefficients in the upper stratum model the Osipov – Lanchester model.

**Keywords:** armed conflict, modeling, Osipov – Lanchester differential equations, agent-based approach, stratified simulation models.

### **Введение**

Анализ форм и методов ведения вооруженной борьбы на основе конфликтов последнего времени показывает тенденцию на резкое сокращение времени принятия решений в вопросах

организации и управления силами и средствами воздушно-космической обороны. Это обусловлено целым рядом причин:

– переносом современного вооруженного противостояния в воздушно-космическую сферу, где динамика, точность и скорость ударов имеет постоянный и неубывающий рост;

– повышением числа одновременного применения пространственно распределенных сил и средств воздушно-космического нападения (СВКН) с возможностями концентрации в процессе выполнения боевых задач;

– применением принципов рефлексии [1] при выборе вариантов состава, пространственно-временного распределения СВКН.

Сложившиеся условия требуют от систем отражения воздушно-космических ударов свойств по подстройке к динамично изменяемому поведению противника в процессе нанесения ударов, выражающихся прежде всего возможностями управления имеющимися силами и средствами как в пространстве, так и во времени. По своему предназначению задача управления является оптимизационной. Для ее решения применяются модели процессов отражения ударов СВКН средствами противовоздушной обороны (ПВО), а также поражения как объектов обороны СВКН, так и средств ПВО.

В настоящее время модели вооруженного противоборства строятся на одной из следующих методологий, позволяющих многократно формировать и исследовать различные сценарии развития конфликта: имитационное моделирование, аппарат марковских цепей, дифференциальные уравнения, конечные автоматы, многоагентное представление систем [2]. Причем комплексное применение моделей, построенных одновременно на различных методах, за счет взаимного дополнения друг друга позволяет получить в единой общей модели эмерджентные свойства в виде снижения неопределенности.

В таком случае актуальным становится вопрос интеграции разнотипных моделей в общую модель взаимодействия СВКН — система радиолокационной разведки. Данному вопросу и посвящена статья.

### Оценка влияния коэффициентов в модели Осипова – Ланчестера на результаты моделирования боевых действий

В имитационном моделировании боевых действий общеизвестной и широко применяемой является методология динамики средних (модели Осипова – Ланчестера), берущая свое начало из области моделирования марковских случайных процессов на основе аппарата уравнений

Колмогорова в виде системы дифференциальных уравнений. Анализ работ [3–14] показывает, что модель Осипова – Ланчестера позволяет, во-первых, формализовать противоборство нескольких сторон, во-вторых, описать различные уровни конфликтности между сторонами в зависимости от значений боевых коэффициентов [5] с учетом совершенствования средств, форм и методов вооруженной борьбы.

Рассмотрим систему дифференциальных уравнений, предложенную в данных работах

$$\begin{cases} \dot{m}_1 = -a_1 m_1(t) - \sum_i^N \lambda_i n_i(t) - \sum_j^K c_j n_j(t) m_1(t) + u_1(t); \\ \dots \\ \dot{n}_1 = -b_1 n_1(t) - \sum_i^M \mu_i m_i(t) - \sum_j^S d_j n_j(t) m_j(t) + v_1(t); \\ \dots \end{cases}$$

где  $m, n$  — средняя численность средств в группировках противостоящих сторон различных типов, находящихся в антагонистическом взаимодействии;  $u(t), v(t)$  — возможности и темпы ввода дополнительных резервов различных типов средств противостоящих сторон;  $a, b$  — интенсивность небоевых потерь соответственно группировки средств  $m$  и  $n$  противостоящих сторон;  $\lambda, \mu$  — интенсивность боевых потерь определяемая боевой эффективностью противоположной стороны;  $c, d$  — интенсивность боевых потерь от пространственной концентрации средств своей группировки и интенсивности воздействия противника.

Отметим, что динамика развития вооруженных конфликтов последних лет приводит к необходимости варьирования коэффициентов  $a, b, \lambda, \mu, c, d$  с течением модельного времени и оценке влияния ошибок в их значениях на адекватность моделирования и исход моделируемого конфликта.

Исследуем влияние ошибок при выборе коэффициентов  $a, b, \lambda, \mu, c, d$  на результаты моделирования на основе уравнений Осипова – Ланчестера. Рассмотрим в качестве примера группировку разведывательно-информационных комплексов (РИК), состоящую из размещенных на территории некоторого числа активных сенсоров. Каждый активный сенсор может с течением времени случайным образом менять свое состоя-

ние. Обозначим  $X_i$  различные состояния, в которых может находиться активный сенсор, где состояния:  $X_1$  — сенсор функционирует и излучает в пространство;  $X_2$  — сенсор обнаружен и подвержен огневому подавлению, но не поражен;  $X_3$  — сенсор поражен;  $X_4$  — сенсор не излучает в пространство. Динамику средних численностей указанных состояний можно выразить следующей системой дифференциальных уравнений:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dX_1}{dt} = -X_1\lambda_{12} - X_1\lambda_{14} + X_4\lambda_{41}; \\ \frac{dX_2}{dt} = X_1\lambda_{12} - X_2\lambda_{23}; \\ \frac{dX_3}{dt} = X_2\lambda_{23}; \\ \frac{dX_4}{dt} = X_1\lambda_{14} - X_4\lambda_{41}, \end{array} \right. \quad (2)$$

где  $\lambda_{ij}$  — плотности потоков событий.

Согласно правилам, приведенным в [7], плотность потоков событий  $\lambda_{12}, \lambda_{14}, \lambda_{41}, \lambda_{23}$  активного сенсора из одного состояния в другое, разделяется пропорционально вероятностям пе-

реходов:  $P_{12}$  — вероятность того, что активный сенсор обнаружен и будет подвержен воздействию средств подавления;  $P_{14} = 1 - P_{12}$  — вероятность того, что активный сенсор выключится и не будет обнаружен. Исходя из этого, плотности потоков событий определяются как:

$$\lambda_{12} = \frac{P_{12}}{T_{\text{подавл. сенс.}}}, \quad \lambda_{14} = \frac{P_{14}}{T_{\text{подавл. сенс.}}},$$

$$\lambda_{41} = \frac{1}{T_{\text{выкл. сенс.}}}, \quad \lambda_{34} = \text{const},$$

где  $T_{\text{подавл. сенс.}}$  — среднее время работы активного сенсора не будучи обнаруженным, или время цикла выработки подавляющего воздействия на активный сенсор;  $T_{\text{выкл. сенс.}}$  — среднее время, в течение которого активный сенсор не излучает в пространство. Таким образом в качестве исходных данных задаются  $P_{12}, T_{\text{подавл. сенс.}}, T_{\text{выкл. сенс.}}, N$  (первоначальное число активных сенсоров).

Решение полученной системы уравнений отражает изменение средних значений нахождения системы в принятых состояниях. На рис. 1 представлена динамика изменения состояний

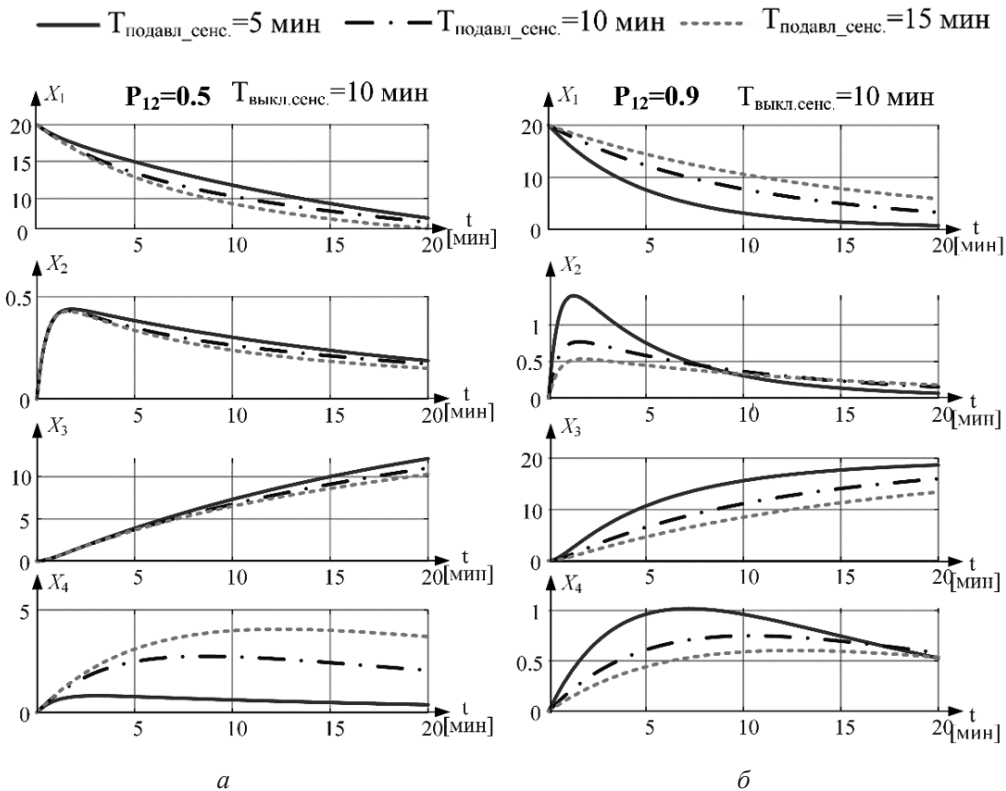


Рис. 1. Динамика изменения средних значений состояний  $X_1 - X_4$  при а —  $P_{12} = 0,5$ ; б —  $P_{12} = 0,9$

при  $\lambda_{34} = 2$ . Полученные результаты позволяют сделать вывод, что без адекватного выбора коэффициентов  $a, b, \lambda, \mu, c, d$ , обеспечить точность оценок противостояния РИК и средств воздушного нападения выше 70–80 % не представляется возможным. Однако обоснованный выбор и адекватное изменение данных коэффициентов с целью повышения точности прогноза является трудноразрешимой задачей.

Проведенный анализ показал, что одним из способов ее решения является разработка иерархических имитационных моделей, в которых «выход» одной модели является «входом» для другой и т.д. Совокупность подобных моделей может рассматриваться в виде иерархии (обычно более низким уровням иерархии соответствует более высокая степень детализации описания моделируемых систем) или горизонтальной цепочки, с сопоставимой степенью детализации [8, 15].

### Структура стратифицированной имитационной модели вооруженного конфликта в воздушно-космической сфере

В соответствии со стратифицированным представлением [16] иерархическая структура модели РИК и СВКН может быть представлена как показано на рис. 2.

Модель Осипова – Ланчестера при иерархическом построении занимает наивысший уровень, обозначенный стратой 2, и позволяет:

– исследовать динамику изменения состояний систем РИК и нападения;

– проводить оценки эффективности функционирования системы РИК в различных условиях складывающейся фоно-целевой обстановки.

Одним из вариантов построения модели нижнего уровня в условиях прогностических возможностей моделей может быть агентно-ориентированный подход [15]. Его достоинством является возможность обобщенного представления взаимодействий противоборствующих сторон с учетом особенностей их функционирования и пространственного расположения. На рис. 3 представлена общая схема взаимодействия противоборствующих сторон. В результате такая модель позволит имитировать динамику не только изменения численности, но и устойчивость состояния систем.

В представлении агентно-ориентированного подхода под агентами понимаются как разнородные СВКН и средства подавления, сенсоры системы радиолокационной разведки (перемещающиеся в пространстве или стационарно располагаемые на местности), так и объекты, формирующие информационные и служебные сведения об этих средствах в соответствии с их деятельностью (целостное информационное пространство вооруженного конфликта) [17, 18].

В соответствии с этим в данную модель, по мнению авторов, целесообразно включить следующие типы агентов (рис. 4).

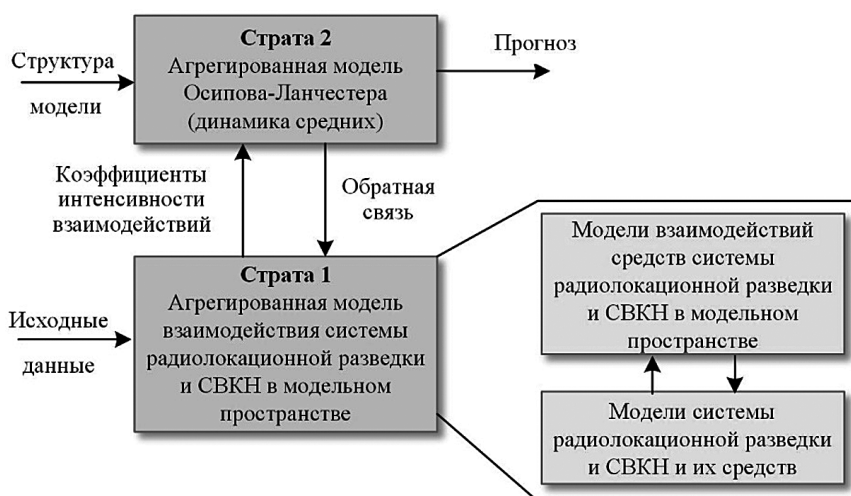


Рис. 2. Стратифицированное представление иерархии моделей взаимодействия РИК и СВКН

Агенты 1-го рода. Агенты пространственной координации и состояния. Служат для оценки и хранения сведений о настоящем состоянии моделируемого объекта или процесса в модельном и функциональном пространствах, а также целей и дальнейших вариантов их изменений.

Агенты 2-го рода. Агенты взаимодействий и коммуникаций. Служат для описания процессов информационного и энергетического взаимодействия между моделируемыми объектами на основании взаимодействия с агентами 1-го и 3-го рода.



Рис. 3. Общая схема взаимодействия противоборствующих систем (страта 1)

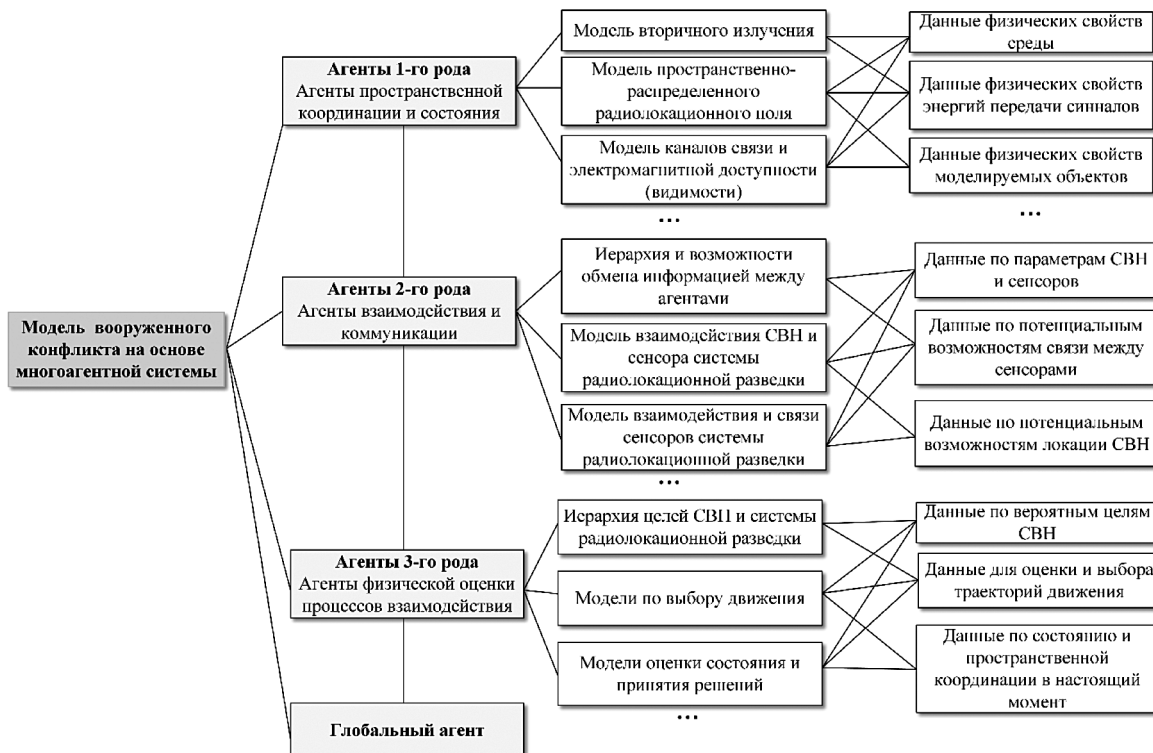


Рис. 4. Структура модели (страта №1) взаимодействия системы радиолокационной разведки и СВКН в представлении агентно-ориентированного подхода

Агенты 3-го рода. Агенты физической оценки процессов взаимодействия. Служат для оценки весовых коэффициентов, вносимых в идеализированные модели взаимодействий моделируемых объектов, посредством энергетических полей, пространственно распределенных в реальной физической среде и имитирующих различные типы погодных и техногенных условий, а также факторов, влияющих на прохождение электромагнитных волн и т.п.

Глобальный агент. Агент модельного пространства, среды. Формирует и синхронизирует между моделируемыми объектами с различными темпами функционирования модельное пространство и время.

В зависимости от текущего размещения в пространстве в определенный момент модельного времени агент 1-го рода имеет различные характеристики в восприятии агентами 2-го и 3-го рода. В таком представлении агенты 2-го и 3-го рода выполняют функцию регулятора-маршрутизатора, определяют возможность взаимной доступности агентов 1-го рода первой и второй системы, путем оценки их взаимного расположения, иерархической сопоставимости, криптоустойчивости и т.д. Техническая реализация глобального агента и агентов 1-го рода возможна за счет применения математического аппарата теории автоматов [19].

### Заключение

В ходе исследования выявлено, что модели конфликта между средствами воздушно-космического нападения и обороны, в первую очередь РИК, полученные на основе метода динамики средних и, в частности, уравнений Осипова – Ланчестера, позволяют оценивать процессы боевых действий со значительными погрешностями. При этом точность прогноза на основе модели в виде уравнений Осипова – Ланчестера не сможет быть выше 70–80 % и зависит от правильности обоснования и выбора траектории динамического изменения коэффициентов.

Сформулирована гипотеза, что расчет текущих оценок коэффициентов в дифференциальном уравнении Осипова – Ланчестера возможен, за счет представления иерархической стратифицированной совокупности разнородных моделей в виде единой общей модели.

В стратифицированной структуре модели, для построения нижнего — высокодетализированного уровня, предложен многоагентный подход, в рамках которого предусматривается создание четырех типов агентов, позволяющих учитывать как специфику моделируемого антагонистического конфликта систем радиолокационной разведки и СВКН во времени и пространстве, так и особенности динамики функционирования отдельных типов элементов противостоящих систем.

Таким образом объединение в стратифицированной имитационной модели различных, по уровню абстракции, методов имитационного моделирования позволит расширить горизонт прогноза исхода конфликта, повысить уровень обобщения и адекватности результатов.

Представленные в статье результаты позволяют сформулировать направления дальнейших исследований:

1. Программно-алгоритмическая реализация представленных аналитических структур стратифицированной имитационной модели, позволяющая за счет анализа данных, генерируемых моделью, разработать методический аппарат для повышения точности оценок результатов антагонистического конфликта.

2. Разработка рекомендаций по использованию результатов моделирования и их практическая реализация в системах поддержки принятия решений при управлении структурой, составом, режимами и функциональными параметрами средств разведки и предупреждения о воздушно-космическом нападении (СРПВКН). Одним из возможных вариантов решения данной задачи является анализ данных, действие которого направлено на выявление предельных нижних характеристик средств СРПВКН по вскрытию факта начала воздушно-космического нападения.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 21-19-00481, <https://rscf.ru/project/21-19-00481/>

### Литература

1. Новиков Д.А., Чхартишвили А.Г. Рефлексия и управление: математические модели. — М.: Издательство физикоматематической литературы, 2013. 412 с.

2. Шумов В.В., Корепанов В.О. Математические модели боевых и военных действий // Компьютерные исследования и моделирование. 2020. Т. 12. № 1. С. 217–242.
3. Рахманов А.А., Абрамов П.Б., Тимошенко А.В., Кочкаров А.А. Оценка динамики развития начального этапа вооруженного конфликта на основе модели Осипова – Ланчестера и Марковских форм с внешними потоками событий // Известия РАН. 2020. № 2 (112). С. 39–45.
4. Андреев В.В., Козирацкий Ю.Л., Албузов А.Т., Иванцов А.В. Модель процесса нанесения внезапного массированного удара средствами воздушного нападения // Вестник АВН. 2017. № 1 (58). С. 78–82.
5. Макаренко С.И., Афонин И.Е., Копичев О.А., Мамончикова А.С. Обобщенная модель Ланчестера, формализующая конфликт нескольких сторон // Автоматизация процессов управления. 2021. № 2 (64). С. 66–76.
6. Василенко В.В., Черноскутов А.И., Ситкевич А.В. Определение эффективной стратегии ведения боя с разнородными группировками при наличии информации у противоборствующих сторон // Известия РАН. 2016. № 2 (92). С. 63–69.
7. Вентцель Е.С. Исследование операций. — М.: Советское радио. 1972. 552 с.
8. Taylor J., Yildirim U., and Murphy W. Hierarchy-of-Models Approach for Aggregated-Force Attrition // Proc. 2000 Winter Simulation Conf. Orlando. 2000. Pp. 925–932.
9. Sheeba P.S., Ghose D. Optimal resource partitioning in conflicts based on Lanchester (n, 1) attrition model // Proceedings of the American Control Conference. 2006. 6 pp. DOI: 10.1109/ACC.2006.1655428.
10. Ганичева А.В. Модифицированная модель Ланчестера боевых действий // Автоматизация процессов управления. 2019. № 4 (58). С. 72–81.
11. Ormrod D., Turnbull B. Attrition rates and maneuver in agent-based simulation models // The Journal of Defense Modeling and Simulation: Applications, Methodology, Technology. 2017. № 14 (3). Pp. 257–272. DOI:10.1177/1548512917692693.
12. Дубограй И.В., Рябцев Р.А., Чуев В.Ю. Вероятностные модели двухсторонних боевых действий многочисленных группировок при упреждающем ударе одной из них // Известия РАН. 2017. № 4 (99). С. 37–46.
13. Шумов В.В., Корепанов В.О. Исследование теоретико-игровых моделей боевых действий // Математическая теория игр и ее приложения. 2021. Т. 13. Вып. 2. С. 80–117.
14. Бреер В.В. Пороговые модели боевых действий // УБС. 2020. Вып. 84. С. 35–50.
15. Новиков Д.А. Иерархические модели военных действий // УБС. 2012. № 37. С. 25–62.
16. Кузнецов А.В. Модель совместного движения агентов с трехуровневой иерархией на основе клеточного автомата // Журн. вычисл. математики и мат. физики. 2017. Т. 57. № 2. С. 339–349.
17. Маслобоев А.В. Гибридная архитектура интеллектуального агента с имитационным аппаратом // Вестник МГТУ. 2009. Т. 12. № 1. С. 113–124.
18. Кузнецов А.В. Упрощенная модель боевых действий на основе клеточного автомата // Известия РАН. Теория и системы управления. 2017. № 3. С. 59–71.
19. Месарович М. Теория иерархических многоуровневых систем: пер. с англ. / М. Месарович, Д. Мако и И. Такахара; под ред. И.Ф. Шахнова. — М.: Мир, 1973. 344 с.