

# ПРИМЕНЕНИЕ ЛОГИКО-ВЕРОЯТНОСТНОГО МЕТОДА В ИНФОРМАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ. Часть 5

Калашников А. О.<sup>1</sup>, Аникина Е. В.<sup>2</sup>, Бугайский К. А.<sup>3</sup>, Бирин Д. С.<sup>4</sup>,  
Дерябин Б. О.<sup>5</sup>, Цепенда С. О.<sup>6</sup>, Табаков К. В.<sup>7</sup>

DOI: 10.21681/2311-3456-2024-4-26-37

**Цель исследования:** адаптация логико-вероятностного метода оценивания сложных систем к задачам построения систем защиты информации в многоагентной системе.

**Метод исследования:** при проведении исследования использовались основные положения методологии структурного анализа, системного анализа, теории принятия решений, методов оценивания событий при условии неполной информации, логико-вероятностных методов.

**Полученный результат:** данная статья продолжает рассмотрение вопросов информационной безопасности на основе анализа отношений между субъектами и объектом защиты. Показано, что состояние отношений агента может быть получено на основе соответствующих оценок состояний на уровне информационных ресурсов и информационных потоков. Показано, что оценка состояний может быть проведена как на качественном, так и на количественном уровнях, на основе формируемых в агенте, в результате внешних воздействий, наборов событий и сообщений. Предложены механизмы качественного и количественного оценивания состояний отношений между субъектами и объектом защиты. Полученные результаты обеспечивают обоснованное вычисление и применение вероятностных характеристик для последующего применения логико-вероятностного метода при анализе указанных отношений.

**Научная новизна:** рассмотрение вопросов защиты информации с использованием аппарата математических и логических отношений. Сформулирована гипотеза о структуре многоагентной системы с точки зрения информационной безопасности. Разработаны методы качественного определения состояний отношений на уровне агентов. Разработаны методы получения вероятностных оценок состояний отношений на уровне. Показана возможность получения интегральных вероятностных оценок для различных подсистем современных информационных систем за счет агрегирования соответствующих оценок агентов.

**Вклад авторов:** Калашников А. О. выполнил постановку задачи и общую разработку модели применения логико-вероятностного метода в информационной безопасности. Бугайский К. А. и Аникина Е. В. участвовали в написании всех разделов статьи. Бирин Д. С. и Дерябин Б. О. участвовали в написании раздела о доверии состояния агента. Цепенда С. О. и Табаков К. В. участвовали в написании раздела о масштабировании доверия агента.

**Ключевые слова:** модель информационной безопасности, оценка сложных систем, логико-вероятностный метод, теория отношений, системный анализ.

## APPLICATION OF THE LOGICAL-PROBABILISTIC METHOD IN INFORMATION SECURITY. Part 5

Kalashnikov A. O.<sup>8</sup>, Anikina E. V.<sup>9</sup>, Bugajskij K. A.<sup>10</sup>, Birin D. S.<sup>11</sup>,  
Deryabin B. O.<sup>12</sup>, Tsependa S. O.<sup>13</sup>, Tabakov K. V.<sup>14</sup>

- 1 Калашников Андрей Олегович, доктор технических наук, главный научный сотрудник лаборатории «Безопасности сложных систем» ФГБУН Институт проблем управления им. В. А. Трапезникова РАН, г. Москва, Россия. E-mail: aokalash@ipu.ru
- 2 Аникина Евгения Владимировна, научный сотрудник лаборатории «Безопасности сложных систем» ФГБУН Институт проблем управления им. В. А. Трапезникова РАН, г. Москва, Россия. E-mail: ajanet@ipu.ru
- 3 Бугайский Константин Алексеевич, младший научный сотрудник лаборатории «Безопасности сложных систем» ФГБУН Институт проблем управления им. В. А. Трапезникова РАН, г. Москва, Россия. E-mail: kabuga@ipu.ru
- 4 Бирин Денис Сергеевич, младший научный сотрудник Научно-внедренческого отдела 89 ФГБУН Институт проблем управления им. В. А. Трапезникова РАН, г. Москва, Россия. E-mail: birin@phystech.edu
- 5 Дерябин Богдан Олегович, младший научный сотрудник Научно-внедренческого отдела 89 ФГБУН Институт проблем управления им. В. А. Трапезникова РАН, г. Москва, Россия. E-mail: бага\_d@mail.ru
- 6 Цепенда Сергей Олегович, младший научный сотрудник Научно-внедренческого отдела 89 ФГБУН Институт проблем управления им. В. А. Трапезникова РАН, г. Москва, Россия. E-mail: tsepende.s@gmail.com
- 7 Табаков Кирилл Викторович, младший научный сотрудник Научно-внедренческого отдела 89 ФГБУН Институт проблем управления им. В. А. Трапезникова РАН, г. Москва, Россия. E-mail: tabakov2002@mail.ru
- 8 Andrey O. Kalashnikov, Dr.Sc., Chief Scientist of the Laboratory «Security of complex systems» Institute of Control Sciences of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia. E-mail: aokalash@ipu.ru
- 9 Eugenia V. Anikina, Research Fellow of the Laboratory « Security of complex systems » Institute of Control Sciences of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia. E-mail: ajanet@ipu.ru
- 10 Konstantin A. Bugajskij, Junior Researcher of the Laboratory « Security of complex systems » Institute of Control Sciences of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia. E-mail: kabuga@ipu.ru
- 11 Denis S. Birin, Junior Researcher of the Scientific and Implementation Department Institute of Control Sciences of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia. E-mail: birin@phystech.edu
- 12 Bogdan O. Deryabin, Junior Researcher of the Scientific and Implementation Department Institute of Control Sciences of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia. E-mail: бага\_d@mail.ru
- 13 Sergey O. Tsependa, Junior Researcher of the Scientific and Implementation Department Institute of Control Sciences of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia. E-mail: tsepende.s@gmail.com
- 14 Kirill V. Tabakov, Junior Researcher of the Scientific and Implementation Department Institute of Control Sciences of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia. E-mail: tabakov2002@mail.ru

**The purpose of the article:** adaptation of the logical-probabilistic method of evaluating complex systems to the tasks of building information security systems in a multi-agent system.

**Research method:** during the research, the main provisions of the methodology of structural analysis, system analysis, decision theory, methods of evaluating events under the condition of incomplete information were used.

**The result:** this article continues the consideration of information security issues based on the analysis of the relationship between the subjects and the object of protection. It is shown that the state of the agent's relations can be obtained on the basis of appropriate assessments of states at the level of information resources and information flows from the agent. It is shown that the assessment of states can be carried out at the qualitative and quantitative levels on the basis of sets of events and messages formed in the agent as a result of external influences. The mechanisms of qualitative and quantitative assessment of the states of relations are proposed. The obtained results provide a reasonable acquisition and application of probabilistic characteristics for the subsequent application of the logical-probabilistic method in the analysis of relations between subjects and the object of protection.

**Scientific novelty** consideration of information security issues using the apparatus of mathematical and logical relations. A hypothesis about the structure of a multi-agent system from the point of view of information security is formulated. Methods of qualitative determination of the states of relations at the agent level have been developed. Methods for obtaining probabilistic estimates of the states of relations at the level have been developed. The possibility of obtaining integral probabilistic estimates for various subsystems of modern information systems by aggregating the corresponding estimates of agents is shown.

**Keywords:** information security model, assessment of complex systems, logical-probabilistic method, theory of relations, system analysis.

## Введение

Данная статья является пятой из серии публикаций, посвященных исследованию вопроса применения логико-вероятностного метода при изучении вопросов защиты информации. Метод был разработан Рябининым И.А. [1, см. ссылки на соответствующую литературу там же] и приобрел популярность при проведении исследований, в том числе, связанных с анализом и оценкой рисков сложных систем. Прежде всего для решения вопросов оценки надежности работы систем и анализа причин возникновения аварийных ситуаций. Логико-вероятностный метод предполагает решение следующих задач:

1. Построение структурно-логической модели системы за счет выделения и использования событий с несовместными исходами.
2. Проведение преобразований полученных логических уравнений на основе функций булевой алгебры с целью получения системы уравнений с конечным числом переменных.
3. Теоретически обоснованный переход от уравнений булевой алгебры к уравнениям с вероятностными переменными.

К несомненным достоинствам логико-вероятностного метода следует отнести его способность обеспечить прозрачность процедур анализа и оценки сложных систем, а также хорошие адаптационные способности к новым задачам. Результатом применения логико-вероятностного метода являются количественные оценки риска как вероятности нарушения работоспособности системы. Интерес к логико-вероятностному методу – помимо типичных вопросов надежности систем, – в настоящее время подкрепляется исследованием задач машинного обучения

и связанных с ними проблем оптимизации расчетов [см., например, 2–5]. В частности, логико-вероятностный метод обеспечивает хорошую точность и стабильность результатов в задачах распознавания тех или иных объектов. Логико-вероятностный метод также находит свое применение и при решении задач защиты информации [см., например, 6–11].

Тем не менее, представляется, что логико-вероятностный метод обладает значительно большим, пока не раскрытым, потенциалом в случае его дальнейшего развития и адаптации к решению различных задач в области информационной безопасности (далее – ИБ).

## Постановка задачи

Логико-вероятностный метод обладает достаточно обширным набором подходов и решений по работе с логическими функциями, описывающими функционирование сложных систем, какими являются современные информационные системы (далее – ИС). Исследование применимости логико-вероятностного метода для решения задач ИБ базируется на представлении ИС в виде отношений между агентами.

В рамках достижения общей цели исследования возникает задача разработки формально-логических основ для вычисления вероятностных параметров характеризующих состояния отношений конкретного агента с другими агентами из состава ИС. Разработка таких вероятностных параметров на системном уровне выполнена в настоящей статье.

## Общие положения

Приведем некоторые сведения из предыдущих статей цикла [12–15], которые необходимы для решения поставленной задачи.

1. Определим агентов из состава ИС, участвующих в обмене информацией с данным, как респондентов. Состояние отношений между агентом  $\beta$  и его респондентом  $\gamma$  являются следствием внешнего воздействия на агента со стороны респондента. Такие состояния отношений  $\beta R \gamma$  агента с респондентом (далее – состояния) образуют множество  $R = \{Lr, Dr, Ir, Ur\}$ , где  $Lr$  означает Лояльное,  $Dr$  – Нелояльное,  $Ir$  – Неопределенное и  $Ur$  – Безразличное.
2. Агент (см. [13], определение *Def. 5*) представляет из себя набор информационных ресурсов (далее – ИР) и информационных потоков (далее – ИП), обеспечивающих обработку определенной категории данных в интересах субъекта, представленного аккаунтом в ИС. В дальнейшем все ИП и ИР агента будем определять как объекты. Обозначим через  $K$  множество объектов, входящих в состав агента.
3. Для каждого объекта  $k \in K$  и для каждого из возможных состояний агента  $r \in R$  может быть вычислена [15] оценка правдоподобия нахождения объекта в том или ином состоянии или уровень доверия к нахождению объекта в определенном состоянии. В дальнейшем этот уровень доверия будем обозначать как  $p_k^r$ .
4. Нахождение агента в том или ином состоянии определяется аналогичными (по типу) состояниями объектов из его состава. Для определения состояния агента необходимо учитывать уровни доверия состояний всех объектов из его состава.
5. В предыдущих статьях цикла [12, 13] были рассмотрены аксиомы о характере отношений между агентами в ИС. Приведем краткое содержание этих аксиом, сохраняя их нумерацию в [12, 13]:

*Аксиома 3.* Любой агент – участник отношения может быть только Лояльным или Безразличным (отключенным) по отношению к себе.

*Аксиома 5.* Любой агент – участник отношения может находиться только в одном состоянии из  $R$  в фиксированный момент времени:

*Аксиома 7.* Объекты (ИП и ИР) внутри агента всегда Лояльны по отношению друг к другу.

*Аксиома 8.* Любой субъект – пользователь ИС представлен в ИС как агент.

*Аксиома 10.* Отношения «субъект-субъект» и «субъект-объект» в ИС эквивалентны отношениям агентов из состава ИС.

#### Доверие состояния агента

Процесс функционирования агента и его взаимодействия с окружением [12–18] описывается единым множеством состояний:  $R = \{Lr, Dr, Ir, Ur\}$ , независимо от типа аккаунта и числа объектов в составе агента. Сформулируем следующее утверждение.

*Утверждение 1.* Все объекты из состава агента подобны друг другу (изоморфны) в смысле аналогии в характере элементов и отношений между элементами.

Доказательство утверждения основано на следующих соображениях. Обычно различие объектов из состава агента основывается на рассмотрении потенциальных возможностей использования уязвимостей в деструктивных целях, а также на категоризации обрабатываемой объектами информации. В обоих случаях все объекты из состава агента эквивалентны в силу их функционирования в едином пространстве прав доступа аккаунта определяющего состав агента (*Аксиома 8*). Также *Аксиома 7* дает основание говорить об эквивалентности и единобразии отношений между объектами в составе агента. Кроме того, на основании *Аксиом 3, 7 и 10* можно положить, что все объекты из состава агента оказывают влияние на его оценку состояний отношений с респондентами, причем это влияние имеет синергетический эффект. Наконец, еще раз укажем, что в рамках принятого подхода объекты определяются наборами событий (как реакция на внешние воздействия), которые описываются единым для всех набором параметров, то есть обладают подобием в силу ортогонализации их параметров, описанной в [14].

Современные вычислительные средства, содержащие сотни программных компонент, а также методы их разработки, основанные прежде всего на широком повторном использовании кода (например, в виде сторонних фреймворков различных разработчиков) позволяют сделать следующие допущения.

*D1.* Взаимодействие объектов в процессе функционирования агента носит в известной степени стохастический характер с точки зрения возникновения и существования связей между объектами.

*D2.* С точки зрения степени участия в реализации отдельных функций агента роли объектов также отличаются высокой вариативностью.

*Утверждение 1 и допущения D1, D2* позволяют представить агента в виде множества изоморфных объектов, вносящих переменный и слабо предсказуемый вклад в оценку внешних воздействий на агента или формирование состояний отношений агента с респондентами. Необходимо подчеркнуть, что состояния объектов принимают значения из единого множества состояний  $R = \{Lr, Dr, Ir, Ur\}$ , тождественно множеству состояний агента [13, 14].

При этом объекты можно считать независимыми поскольку процедура вычисления уровня доверия их состояний базируется на независимых и уникальных для каждого объекта множествах событий. Кроме того, объекты из состава агента преимущественно

имеют различное функциональное назначение, а, следовательно, необходимо говорить о независимости и вариативности трактовок событий и состояний с точки зрения защиты информации. Таким образом, значения уровней доверия состояний для каждого из объектов из состава агента образуют вектор  $Q_k^r = [p_k^L, p_k^D, p_k^I, p_k^U]$ .

Используя подход, изложенный в предыдущей статье цикла [15], в качестве вероятностной характеристики состояния отношений агент-респондент  $\beta R\gamma$ , как отклика на внешнее воздействие, будем рассматривать уровень доверия к нахождению агента в определенном состоянии.

Согласно Аксиоме 5 в каждый фиксированный момент времени отношение агент-респондент  $\beta R\gamma$  может принимать только одно значение из  $R$ . Следовательно, каждое из состояний множества  $R$  можно рассматривать как альтернативную гипотезу для отношения  $\beta R\gamma$  агента. Таким образом, следует рассматривать определение состояния отношения агента как задачу выбора гипотезы и определения уровня доверия к этому выбору на основании доказательств представленных уровнями доверия  $p_k^r$  состояний объектов из состава агента.

Определим функцию выбора гипотезы о состоянии отношений агента, например  $H(Lr) = FG(\cup_{k \in K} p_k^r)$  или в общем виде:

$$H(r) = FG(\cup_{k \in K} p_k^r) \quad (1)$$

Из выражения (1) следует, что для выбора гипотез, функция  $FG$  должна опираться на метрику, позволяющую обрабатывать различные сочетания компонент векторов  $Q_k^r$  объектов из состава агента. Изоморфность объектов позволяет рассматривать вектор  $Q_k^r$  для каждого объекта как множество  $A_k^r = \{p_k^L, p_k^D, p_k^I, p_k^U\}$ . Обозначим  $B = \cup_{k \in K} A_k^r$  и определим величину  $\mu: R \times B \rightarrow E$ ,  $E = [1, 2, 3, 4]$  как меру  $\mu \in E$ , которая должна для каждого из объектов выполнять условия:

$$1 \leq \mu_k^r \leq 4, \\ p_k^i < p_k^j \Rightarrow \mu_k^i < \mu_k^j, i, j \in R.$$

Фактически речь идет о ранжировании состояний объектов в соответствии со значениями вектора  $Q_k^r$ :  $\min Q_k^r \Rightarrow \mu_k^r = 1$  и  $\max Q_k^r \Rightarrow \mu_k^r = 4$ . Введенная мера позволяет при определении состояний объекта перейти от вектора уровней доверия  $Q_k^r = [p_k^L, p_k^D, p_k^I, p_k^U]$  к вектору рангов  $V_k^r = [\mu_k^L, \mu_k^D, \mu_k^I, \mu_k^U]$  и на основании изоморфности объектов переписать выражение (1) как:

$$H(r) = FG(\cup_{k \in K} \mu_k^r) \quad (2)$$

Из выражения (2) следует, что для сравнения гипотез функция  $FG$  должна выполнять агрегирование

величин из множества  $M_H = \cup_{k \in K} \mu_k^r$ . Проведенные ранее исследования, связанные с описанием внешних воздействий на агента [19–23], а также выражения (1) и (2) позволяют говорить об аддитивном и немотонном характере функции  $FG$ .

Напомним, что объекты из состава агента преимущественно имеют различное функциональное назначение, что влечет независимость и вариативность трактовок событий и состояний и позволяет (согласно [15]) рассматривать уровни доверия  $p_k^r$  и соответствующую меру  $\mu_k^r$  состояния каждого объекта из состава агента в качестве критериев для выбора гипотезы  $H(r)$ .

Следовательно, функция  $FG$  должна обеспечивать агрегирование величин из множества  $M_H = \cup_{k \in K} \mu_k^r$  через операцию многокритериальной свертки. Данную свертку проведем на базе методологии комплексного оценивания состояний объектов агента, для чего будем опираться на положения и выводы, изложенные в [24–28]. Свертка на основе комплексного оценивания определяется структурой матриц свертки и порядком их применения, что практически полностью определяется порядком следования и значимостью (весом в агрегированном результате) сворачиваемых критериев. Выражение (2) позволяет сформулировать следующее утверждение.

**Утверждение 2.** Для выбора гипотезы о состоянии отношений агента достаточно учитывать только порядок следования рангов объектов как критериев свертки.

**Доказательство утверждения.** Из предыдущих рассуждений следует, что состояние отношений агента определяется состояниями объектов, то есть их реакцией на внешние воздействия. Реакция объекта на внешние воздействия определяется наличием уязвимостей, слабостей и ошибок в объектах. Если рассмотреть все объекты (ИР и ИП) из состава агента с точки зрения их функционирования как элементов вычислительной системы, то все они эквивалентны в силу наличия системных вызовов при обращении к физическим носителям информации [16–18]. Поскольку для выбора гипотезы имеет значение наличие реакции объекта, то есть его состояние, а не вызвавшие его причины, то все объекты из состава агента *равноценны* в смысле веса при проведении комплексного оценивания. Аксиома 7 и допущения  $D1, D2$  позволяют представить структуру агента в виде полного графа, при этом любое внешнее воздействие на агента имеет «точку входа» и «целевую точку», которые целесообразно ассоциировать с тем или иным объектом из состава агента. Следовательно, внешнее воздействие отображается на некую последовательность объектов на графе различающихся только расстоянием от начальной («точки входа») или конечной («целевой точки») вершин.

Таким образом, на основании Утверждения 2 порядок следования матриц комплексного оценивания должен обеспечивать последовательный перебор необходимых критериев и представлять собой ветвь дерева.

Утверждение 3. Все узлы ветви дерева комплексного оценивания представляют собой единую матрицу свертки.

Доказательство вытекает из Утверждения 1 и Утверждения 2.

С учетом свойства синергии объектов матрица свертки рангов состояний объектов  $E \times E$  для оценки отдельного состояния отношений агента примет вид:

$$\| \eta_{ij} \| = E \times E = \begin{bmatrix} 3 & 3 & 4 & 4 \\ 2 & 2 & 3 & 4 \\ 1 & 2 & 2 & 3 \\ 1 & 1 & 2 & 3 \end{bmatrix} \quad (3)$$

Утверждение 3 позволяет определить необходимое число шагов с применением матрицы свертки как:  $S = |K| - 1$ .

Отметим, что Утверждение 2 и Утверждение 3 обеспечивают наименьшие вычислительные затраты и возможность распараллеливания процедур комплексного оценивания для каждой из гипотез (2).

Обозначим операцию свертки как « $\bowtie$ », сворачиваемый на отдельном шаге ранг объекта как  $\mu(k)$ , а результат свертки на данном шаге как  $\eta(s)$ . Процедуру комплексного оценивания можно представить в виде рекурсии:

$$\eta(s) = \eta(s - 1) \bowtie \mu(k) \quad (4)$$

Свертка на каждом шаге комплексного оценивания представляет из себя один из следующих вариантов соотношений сворачиваемых величин:

sy1:  $\mu(k) < \eta(s - 1) \rightarrow \eta(s) < \eta(s - 1)$  – ранг очередного объекта уменьшает результат свертки;

sy2:  $\mu(k) < \eta(s - 1) \rightarrow \eta(s) > \eta(s - 1)$  – ранг очередного объекта увеличивает результат свертки;

sy3:  $\mu(k) < \eta(s - 1) \rightarrow \eta(s) = \eta(s - 1)$  – результат свертки остается неизменным.

Варианты строгого неравенства sy1 и sy2 позволяют использовать аналогию ставок, которые понижают и повышают итоговый ранг комплексного оценивания. Соответственно, принимаем величины  $\mu(k)$  на каждом шаге как участвующие в свертке критерии несущие отрицательную и положительную коннотацию с точки зрения получения конечного результата комплексного оценивания гипотезы  $H(r)$  о текущем состоянии отношения агента. То есть, будем трактовать  $\mu(k)$  как категории «за» или «против» результата, что дает возможность для формирования следующих логических выражений:

*pro* – участвующий на данном шаге комплексного оценивания объект своим состоянием подтверждает гипотезу  $H(r)$  о текущем состоянии отношения агента;

*contra* – участвующий на данном шаге комплексного оценивания объект своим состоянием отрицает гипотезу  $H(r)$  о текущем состоянии отношения агента;

*undef* – участвующий на данном шаге комплексного оценивания объект своим состоянием вносит неопределенность в оценке гипотезы  $H(r)$  о текущем состоянии отношения агента.

Для случая неизменности результата свертки дадим следующие трактовки:

sy31 – при значении ячейки матрицы  $\eta_{ij} = 1$  состояние объекта отрицает гипотезу  $H(r)$  о текущем состоянии отношения агента;

sy32 – при значении ячейки матрицы  $\eta_{ij} = 2$  состояние объекта в основном отрицает гипотезу  $H(r)$  о текущем состоянии отношения агента;

sy33 – при значении ячейки матрицы  $\eta_{ij} = 3$  состояние объекта в основном поддерживает гипотезу  $H(r)$  о текущем состоянии отношения агента;

sy34 – при значении ячейки матрицы  $\eta_{ij} = 4$  состояние объекта подтверждает гипотезу  $H(r)$  о текущем состоянии отношения агента.

Образуем множество  $SY = \{sy1, sy2, sy31, sy32, sy33, sy34\}$  и на его основе введем правила формирования категорий оценки соответствующих логическим выражениям *pro*, *contra* и *undef*, предварительно сделав следующее утверждение.

Утверждение 4. Элементы множества  $SY$ , получаемые в результате применения матрицы свертки на каждом шаге комплексного оценивания, могут использоваться в качестве критерия отнесения величин  $p_k^r$  сворачиваемых объектов к той или иной категории – *pro*, *contra* или *undef*.

Доказательство утверждения основано на аддитивности функции  $FG$  и тождественности  $\mu_k^r = p_k^r$ , вытекающей из выражений (1–4).

Обозначим через  $p_k^r(y)$ ,  $y \in SY$  величину  $p_k^r$  соответствующую правилу формирования конкретного логического выражения на основании выбора элементов из множества  $SY$ .

Категорию  $pro(r, SY)$  будем рассматривать как сумму доказательств повышающих уверенность в результате комплексного оценивания гипотезы  $H(r)$ :

$$pro(r, SY) = \sum_K p_k^r(y), y = sy2 \cup sy34 \quad (5)$$

Категорию  $contra(r, SY)$  будем рассматривать как сумму доказательств снижающих уверенность в результате комплексного оценивания гипотезы  $H(r)$ :

$$contra(r, SY) = \sum_K p_k^r(y), y = sy1 \cup sy31 \quad (6)$$

Категорию  $undef(r, SY)$  будем рассматривать как сумму доказательств снижающих уверенность в результате комплексного оценивания гипотезы  $H(r)$ :

$$undef(r, SY) = \sum_K p_k^r(y), y = sy32 \cup sy33 \quad (7)$$

Согласно Аксиомы 5 в фиксированный момент времени агент может находиться только в одном из возможных состояний отношений:

$$\beta R\gamma = Lr \overline{DrIrUr} \vee Lr \overline{Dr} \overline{IrUr} \vee Lr \overline{Dr} Ir \overline{Ur} \vee Lr \overline{DrIr} Ur \quad (8)$$

Выражение (8) определяет «активное» состояние отношения агента и показывает, что порядок определения активного состояния единообразен для всех состояний. Предыдущие рассуждения позволяют отождествить состояние агента с той или иной гипотезой. Это дает основание определить множество гипотез  $H = \{h_1, h_2, h_3, h_4\}$  и ввести высказывания  $x_i$  – «гипотеза принимается» и  $\bar{x}_i$  – «гипотеза отвергается», которые образуют функции  $f^1(x_1, x_2, x_3, x_4) = 1$  и  $f^0(\bar{x}_1, \bar{x}_2, \bar{x}_3, \bar{x}_4) = 0$ . Соответственно, выражение (8) можем записать как  $h_1 \vee h_2 \vee h_3 \vee h_4 = 1$ , где гипотезы принимают вид  $h_1 = x_1 \bar{x}_2 \bar{x}_3 \bar{x}_4$ ,  $h_2 = x_2 \bar{x}_1 \bar{x}_3 \bar{x}_4$ ,  $h_3 = x_3 \bar{x}_1 \bar{x}_2 \bar{x}_4$  и  $h_4 = x_4 \bar{x}_1 \bar{x}_2 \bar{x}_3$ . Тогда:  $1 - h_1 = h_2 \vee h_3 \vee h_4$  означает условие для отказа от гипотезы  $h_1$ , что полностью запишется как;

$$1 - x_1 \bar{x}_2 \bar{x}_3 \bar{x}_4 = x_2 \bar{x}_1 \bar{x}_3 \bar{x}_4 \vee x_3 \bar{x}_1 \bar{x}_2 \bar{x}_4 \vee x_4 \bar{x}_1 \bar{x}_2 \bar{x}_3 \quad (9)$$

Выражение (9) представляет собой совершенную ДНФ, что позволяет перейти к определению оценки доверия состояния отношения (гипотезы) агента в соответствии с выражениями (5–7). Обозначим вероятности истинности аргументов за принятие гипотезы, как  $\varrho_i = p(x_i)$ , а вероятности истинности аргументов за отвержение гипотезы как  $\epsilon_i = p(\bar{x}_i)$ . Тогда выражение (9) с учетом  $h_1' = 1 - h_1$  примет вид:

$$p(h_1') = \epsilon_1 \epsilon_3 \epsilon_4 \varrho_2 + \epsilon_1 \epsilon_2 \epsilon_4 \varrho_3 + \epsilon_1 \epsilon_2 \epsilon_3 \varrho_4 \quad (10)$$

Для гипотез  $h_2, h_3, h_4$  расчеты выполняются аналогично выражениям (9) и (10). Для определения величин  $\varrho_i = p(x_i)$  и  $\epsilon_i = p(\bar{x}_i)$  вернемся к определениям результатов комплексного оценивания данных в (4)–(7) и введем нормировочную величину  $norm(r) = \sum_K p_k^r$ . Тогда нормализованное доказательство повышающее уверенность в результате комплексного оценивания гипотезы  $H(r)$  равно  $\varrho_r = pro(r, SY) / norm(r)$ , а, соответственно, нормализованное доказательство снижающее уверенность –  $\epsilon_r = contra(r, SY) / norm(r)$ . Обозначим:  $v_r = undef(r, SY) / norm(r)$ . Роль этой величины как показателя неопределенности при определении состояния отношений агента будет рассмотрена в следующих статьях цикла. Отметим, что из выражений (4)–(7) следует  $\varrho_r + \epsilon_r + v_r = 1$ . В итоге мы получим матрицу исходных оценок гипотез состояний агента  $AQ = \|\alpha_{row, col}\|$ , где  $row = \{h_1, h_2, h_3, h_4\}$  и  $col = \{pro, contra, undef, \eta_r, p(h_r')\}$  общий вид которой приведен в табл. 1.

Таблица 1.

Матрица исходных оценок гипотез

	<i>pro</i>	<i>contra</i>	<i>undef</i>	$\eta_r$	$p(h_r')$
$h_1$	$\varrho_1$	$\epsilon_1$	$v_1$	$\eta_1$	$p(h_1')$
$h_2$	$\varrho_2$	$\epsilon_2$	$v_2$	$\eta_2$	$p(h_2')$
$h_3$	$\varrho_3$	$\epsilon_3$	$v_3$	$\eta_3$	$p(h_3')$
$h_4$	$\varrho_4$	$\epsilon_4$	$v_4$	$\eta_4$	$p(h_4')$

Выбор текущего или «активного» состояния отношения агента из  $R = \{Lr, Dr, Ir, Ur\}$  определяется через максимизацию результатов комплексного оценивания  $\eta_r$ , а в случае их равенства – через минимизацию  $p(h_r')$ :

$$\beta R\gamma = q_\gamma = \min_{p(h_i)} \max_{\eta_r} \|\alpha_{row, col}\| \quad (11)$$

### Масштабирование доверия агента

Выражение (11) позволяет описать состояние отношения агента  $\beta$  с отдельным респондентом  $\gamma$  как  $q_\gamma \llbracket \eta_r, P_\gamma^\beta \rrbracket$ , где  $P_\gamma^\beta = 1 - p(h_r)$ ,  $r \in R$ . Если в качестве примера агента взять веб-портал, то число респондентов может составлять несколько тысяч и полной характеристикой агента с точки зрения ИБ будет вектор состояний отношений агента со всеми его респондентами  $Q_\beta^\gamma$  с учетом рекурсии (4). Таким образом, можно говорить о необходимости «горизонтального» масштабирования результатов предыдущего раздела с целью оптимизации размера вектора  $Q_\beta^\gamma$  состояний отношений агента.

Во второй части статьи [13] было показано, что каждый агент содержит в своем составе как минимум одну точку доступа. Точка доступа представляет из себя набор предопределенных на этапе разработки логических протоколов и правил обработки входящих данных поступающих через фиксированные открытые TCP и UDP порты, различные сокет, каналы и т.п. Можно утверждать, что главное свойство точки доступа – это безотказность приема входящих данных. Вернемся к примеру с веб-порталом, когда все клиенты используют единую точку доступа соответствующего агента. Здесь необходимо сделать следующее допущение.

D3. С учетом развития современных ИС можно говорить о наличии следующих особенностей присущих агенту:

- ❖ отдельные объекты из состава агента могут иметь внутренний список пользователей;
- ❖ списки пользователей отдельных объектов могут различаться вплоть до полного несовпадения;
- ❖ на объектах и в целом в рамках агента управление доступом осуществляется на основе ролевого доступа и его модификаций;
- ❖ точка доступа агента по своему входу индифферентна по отношению к клиентам.

Как показано во второй [13] и третьей [14] частях настоящей работы, точки доступа агента представляют из себя сочетания объектов (ИП и ИР). Именно такие ИП и ИР формируют и являются носителями подмножества  $M^\alpha$  событий и сообщений, отвечающие на вопросы «кто, где, когда» и позволяющих идентифицировать клиента на уровне объектов (см. [14], раздел «Формализация исходных данных»). Возвращаясь к примеру веб-портала отметим, что идентификацию клиентов осуществляет (как правило) веб-сервер и при этом его доступ к клиентским данным в базе данных портала идет от ограниченного круга ее пользователей. Что можно отобразить в виде следующей схемы:

$$\begin{array}{c} \text{IdClient} \rightarrow \text{Role (IdClient)} \rightarrow \\ \xrightarrow{\text{HTTP server}} \text{UserDB(Role)} \rightarrow \text{DataDB(IdClient)} \\ \xrightarrow{\text{Data Base}} \end{array}$$

Отметим, что выражение  $\text{DataDB(IdClient)}$  означает, что идентификатор клиента является одним из индексов базы данных обеспечивающих обработку требуемой информации. Выражение « $\text{IdClient} \rightarrow$ » как раз и является аналогом точки доступа агента. Сделаем следующее утверждение.

**Утверждение 5.** Каждая из точек доступа агента эквивалентна одному из его респондентов, что позволяет принять число респондентов агента равным числу его точек доступа.

Для доказательства утверждения приведем следующее рассуждения.

Обозначим:  $QR$  – ИР,  $QS$  – ИП,  $D^{in}$  – входные данные,  $D^{out}$  – выходные данные, а  $D^*$ ,  $M^*$  – промежуточные данные и сопутствующие события и сообщения агента. Тогда схему работы агента в рамках текущего подхода можно представить следующим образом:

$$D^{in} \rightarrow QS_1(D^{in}, M^\alpha) \rightarrow QR_1(D^{in}, M^\alpha) \rightarrow QS_i(D^*, M^*) \rightarrow QR_i(D^*, M^*) \rightarrow \dots \rightarrow QR_s(D^*, M^*) \rightarrow D^{out} \quad (12)$$

Компонент  $D^{in} \rightarrow QS_1(D^{in}, M^\alpha) \rightarrow QR_1(D^{in}, M^\alpha)$  выражения (12) описывает реакцию агента на поступающие данные или « $\text{IdClient} \rightarrow$ ». Отметим, что именно через этот компонент возможно деструктивное воздействие и именно здесь в ответ на деструктивные действия одного из клиентов, агент может принять только такие меры противодействия, которые отразятся на параметрах работоспособности всей точки доступа, а значит на всех клиентах. Вопросы, связанные с такими действиями, как выборочная фильтрация клиентов или их запросов, на данном этапе рассматривать не будем, поскольку обычно эти действия (например, функции межсетевого экрана или файервола веб-приложений) выполняет другой агент в ИС. Таким образом, объекты  $QS_1$  и  $QR_1$  фактически образуют точку доступа агента, что и требовалось доказать.

Компонент  $QR_s(D^*, M^*) \rightarrow D^{out}$  выражения (12) можно рассматривать в виде цели внешнего воздействия со стороны нарушителя, который получает требуемый доступ к определенным данным агента или получает возможность манипулировать выходными данными агента, то есть воздействовать на другие агенты ИС.

Компонент  $QR_i(D^*, M^*) \rightarrow QR_s(D^*, M^*)$  выражения (12) представляет собой промежуточные объекты из состава агента участвующие в обработке входящих данных. Представляется очевидным, что все перечисленные типы компонент могут быть представлены в виде непересекающихся между собой подмножеств  $LC$ ,  $CC$  и  $RC$  множества объектов из состава агента  $K = LC \cup CC \cup RC$ , которые взаимодействуют между собой по мере развития внешнего воздействия со стороны нарушителя. Тогда выражение (12) можно представить в виде  $LC \rightarrow CC \rightarrow \dots \rightarrow CC \rightarrow RC$ , что дает основания положить, что все объекты агента могут быть упорядочены при проведении процедуры комплексного оценивания.

В качестве промежуточного вывода отметим, что выражение (12) дает основание для введения следующих типов агентов в многоагентной системе по их отношению к данным  $D^{out}$ :

1. Конечный агент – если с точки зрения нарушителя соответствующий ИР является конечной целью его действий с точки зрения нарушения конфиденциальности, целостности и доступности данных  $D^{out}$ . То есть можно полагать, что на этом ИР возможна остановка атаки.
2. Поддерживающий агент – если с точки зрения нарушителя данные  $D^{out}$  агента являются предметом манипуляции в соответствующем выходном ИП для воздействия на респондентов. То есть можно полагать, что ИР и ИП агента используются для развития атаки.

Исследования механизмов комплексного оценивания показывают, что наиболее значимые критерии должны включаться в эту процедуру на завершающих этапах. Тогда можно положить следующий порядок (слева на право) комплексного оценивания объектов на уровне подмножеств  $CC \bowtie RC \bowtie LC$ . При этом подмножество  $LC$  следует рассматривать как состоящее из отдельных непересекающихся подмножеств  $AP$ , каждое из которых представляет собой отдельную точку доступа  $LC = \{AP_1, \dots, AP_l\}$ , где  $l$  – число точек доступа агента.

Далее сделаем следующие допущения с точки зрения ИБ.

**D4.** В силу наличия общесистемных вызовов, дающих общую поверхность атак для всех объектов, а также повторного использования кода, результат комплексного оценивания  $\eta_r^{CC}$  объектов из подмножества  $CC$  и получаемая в итоге матрица  $AQ_{CC}$

является общей для всех объектов из состава подмножеств  $LC$  и  $RC$ .

D5. По результатам анализа известных атак, выполненных компаниями в области ИБ, целевые объекты из  $RC$  как правило могут быть достигнуты из любой точки доступа, что дает основания результаты комплексного оценивания  $\eta_r^{RC}$  объектов из подмножества  $RC$  и получаемую в итоге матрицу  $AQ_{RC}$  полагать общими для всех объектов из состава подмножеств  $LC$ .

Поскольку точки доступа агента  $LC$  эквивалентны его респондентам, то для определения состояния отношений агента  $q_\gamma$   $[\eta_r, P_\gamma^\beta]$  достаточно последовательно использовать элементы матриц  $AQ_{CC}$  и  $AQ_{RC}$  при проведении процедуры комплексного оценивания (в силу ее аддитивности) по объектам каждого из подмножеств  $AP_i \in LC$ :

$$CC \bowtie RC \bowtie AP_i \quad (13)$$

В результате вычисления (13) получаем вектор состояний отношений агента с его респондентами  $Q_\beta^\gamma = [q_1, \dots, q_\kappa]$ , где  $\kappa = |LC|$  – число точек доступа данного агента  $\beta$ .

Предлагаемое «горизонтальное» масштабирование позволяет сократить вычислительную нагрузку при определении состояния отношений агента за счет однократного вычисления матриц  $AQ_{CC}$  и  $AQ_{RC}$  для последующего применения в выражении (13) для каждой из точек доступа.

Упорядочивание объектов из состава агента будем выполнять отдельно на основании следующих рассуждений. Предыдущие статьи цикла показывают, что состояния, принимаемое объектом в результате внешнего воздействия, описываются комбинациями порождаемых этим воздействием событий. То есть, в самом общем виде можно проводить аналогию с термодинамическим определением энтропии. Описанное ранее [15] определение доверия состояния объекта, основанное на сравнении матрицы свертки событий с текущим их набором, позволяет полагать наличие неопределенности в самом факте сравнения. То есть, равномерность заполнения ячеек матрицы свертки событий с одной стороны повышает вероятность совпадения эталонного и текущего наборов событий, но с другой стороны снижает значимость такого совпадения. На основании изложенного сделаем следующее допущение.

D6. Чем более неравномерно по количеству содержание ячеек матрицы сравнения, тем значительнее результат совпадения эталонного и текущего наборов событий.

Поскольку процедура комплексного оценивания выполняется отдельно для каждого из состояний объекта и для каждого из этих состояний существует

своя матрица свертки событий, то, неравномерность заполнения ячеек матрицы свертки событий можно рассматривать как основу для построения соответствующего индекса упорядочивания объектов при комплексном оценивании. В качестве такого индекса будем использовать энтропийный индекс неравенства Тейла. Для наших целей индекс запишем в следующем виде:

$$I_k^r = \frac{1}{N} \sum_{i \in N} \frac{Y_i}{X} \ln \frac{Y_i}{X} \quad (14),$$

где:  $a_{row,col}$  – число значений в ячейке матрицы свертки событий;  $Y = \sum_{row} \sum_{col} a_{row,col}$  – сумма всех значений ячеек отдельной матрицы;  $N = row \times col$  – число ячеек матрицы свертки;  $X = \sum_{i \in N} Y_i / N$  – среднее значение по всем ячейкам;  $k \in K$  – индексируемый объект;  $r \in R$  – индексируемое состояние объекта.

Таким образом, каждая матрица свертки событий, описывающая состояние объекта, в свою очередь описывается индексом (14), что позволяет строить порядок применения объектов агента как параметров комплексного оценивания по возрастанию индекса для каждого из подмножеств  $K = \langle LC, \leq I_k^r \rangle \cup \langle CC, \leq I_k^r \rangle \cup \langle RC, \leq I_k^r \rangle$ .

Необходимо отметить две важные особенности предлагаемого подхода.

1. Построение индекса неравенства осуществляется по эталонным наборам событий и, следовательно, может быть выполнено заранее – на этапе разработки или внедрения агента в состав ИС.
2. В ячейках матрицы свертки событий располагаются значения для признака  $SI$ , которые в соответствии с принятыми в ИБ подходами соответствуют операции типа Запись, Чтение, вызывающие изменения Конфиденциальности, Целостности, Доступности для носителя информации (см. [14], раздел «Формализация исходных данных»), что дает возможность углубленной оценки при проведении комплексного оценивания.

Для дальнейших расчетов переопределим вектор  $Q_\beta^\gamma = [q_1, \dots, q_\gamma, \dots, q_\kappa]$ ,  $\kappa = |LC|$  состояний отношений агента за счет добавления значений из столбцов матрицы исходных оценок гипотез состояний агента  $AQ$  (табл.1). Как отмечалось в начале раздела, выражение (11) обеспечивает выбор строки матрицы на основе представления состояния отношения агента  $\beta$  с отдельным респондентом  $\gamma$ , как  $q_\gamma[\eta_r, P_\gamma^\beta]$ , где  $P_\gamma^\beta = 1 - p(h_r)$ ,  $r \in R$ . Это позволяет описать состояние отношения с отдельным респондентом в виде:  $q_\gamma[\varrho_r, \epsilon_r, v_r, \eta_r, P_\gamma^\beta]$ . Фактически полное описание состояний отношений агента со всеми респондентами будет представлять из себя матрицу состояний отношений относительно точек доступа  $Q_\beta^{LC} = \|q_{row,col}\|$ , где  $row \in LC$  и  $col = \{pro, contra, undef, \eta_r, P_\gamma^\beta\}$ .

Рассмотрение работы ИС с точки зрения различных уровней прав доступа аккаунтов может трактоваться как процедура укрупнения агентов. Согласно определению агента ИБ, приведенному в первом разделе настоящей статьи, ведущим свойством агента является наличие у него прав доступа, что подразумевает вхождение объектов (ИП и ИР) из состава агента с меньшими правами доступа в состав агента с большими правами доступа. Таким образом, возникает проблема определения интегрального уровня доверия при объединении нескольких агентов в один при рассмотрении их работы в ИС с точки зрения аккаунта с повышенными правами доступа.

Обозначим интегрального агента с повышенными правами доступа как  $CA$ , множество интегрируемых агентов как  $A = \{a_1, \dots, a_n\}$ , где  $n$  – число интегрируемых агентов, которое определяется правами доступа соответствующего аккаунта.

Прежде всего отметим, что в состав агента  $CA$  будут входить все объекты, образующие каждого из агентов множества  $A$ . Но помимо этих объектов  $CA$  будет содержать некоторое количество объектов (ИП и ИР), которые в силу прав доступа не входят состав любого агента из  $A$ . Обозначим множество таких объектов  $K^+$ , и представим их как нового агента, обозначаемого  $a_+$ .

Будем полагать, что для объектов из  $K^+$  определены как матрицы сверток событий, так и уровни доверия отношений к внешним воздействиям, а также необходимые индексы неравенства. Соответственно, по результатам выполнения процедуры комплексного оценивания получим описание отдельного агента  $a_+ \llbracket Q_+^{LC} \rrbracket$ . Тогда интегральный агент с повышенными правами доступа описывается как:  $CA \llbracket A, a_+ \rrbracket$ .

Поскольку агент  $a_+$  обладает повышенными правами доступа, то необходимо учесть его влияние на всех интегрируемых агентов. Сделаем следующее утверждение.

**Утверждение 6.** При объединении агентов с меньшими правами доступа в интегральный агент с более высокими правами доступа вопросами взаимодействия интегрируемых агентов можно пренебречь.

Доказательство утверждения основывается на Аксиоме 7, Утверждениях 1, 5 и допущениях D3–D5.

Утверждение 6 и предыдущие разделы статьи позволяют утверждать, что для оценки влияния агента  $a_+$  на остальных агентов в рамках рассматриваемого аккаунта, достаточно выполнить процедуру комплексного оценивания:

$$\forall a_i, q_i = a_i \bowtie a_+ \quad (15)$$

Рассмотрим процедуру комплексного оценивания на уровне агентов (15) подробнее. В общем случае величины  $Q_+^{LC}$  и  $Q_i^{LC}$  содержат для каждой из строк значение  $\eta_n$ , которое фактически является

входным значением для матрицы свертки рангов (3). В силу более высоких прав доступа агента  $a_+$  будем полагать, что все строки  $row_+$  матрицы  $Q_+^{LC}$  влияют на каждую из строк  $row_i$  матрицы  $Q_i^{LC}$  агента  $a_i$ . Это означает, что для каждой  $row_i$  строится дерево матриц свертки рангов и порядок свертки рангов для всех строк  $row_i$  определяется соответствующим индексом неравенства  $I_+$ , определяемого для агента  $a_+$  в соответствии с (14). по результатам процедуры комплексного оценивания на уровне агентов будут пересчитаны оценки отдельных состояний отношений агентов из  $A$  с их респондентами, а также соответствующие уровни доверия.

Отметим, что расчеты для агента  $a_+$  выполняются однократно и затем используются в (15) для всех агентов из  $A$ , что, в частности, обеспечивает хорошее распараллеливание операций комплексного оценивания.

Выражения (11–15) дают основание утверждать, что в результате последовательной интеграции агентов по мере повышения их прав доступа, на каждом уровне интеграции агент  $CA \llbracket A, a_+ \rrbracket$  будет содержать число точек доступа  $LC_+ = \cup_{i \in [1, |A|]} LC_i$  не меньшее, чем сумма точек доступа интегрируемых агентов. При этом изменение уровня доверия состояния агента  $a_i \in A$  будет влиять только на соответствующие точки доступа  $AP_i \in LC$  данного агента, в то время как изменение уровня доверия отношения агента  $a_+$  будет влиять на все точки доступа  $LC_+$  агента  $CA$ .

Материалы текущего раздела позволяют сформулировать следующую гипотезу о структуре многоагентной системы с точки зрения ИБ.

*Представление ИС в виде многоагентной системы предполагает наличие внутренней структуры агентов определяемой структурой прав доступа пользователей данной ИС таким образом, что изменение уровней доверия у агента выше лежащего уровня влияет на все ниже лежащие агенты из состава ИС.*

### Заключение

В рамках общей цели исследования (адаптации логико-вероятностного метода для решения задач ИБ) в статье разработаны формально-логические основы определения вероятностных оценок состояний отношений агентов в многоагентных системах как результат обработки событий и сообщений, формируемых в процессе функционирования агента. Данные вероятностные оценки закладывают основы для последующего применения логико-вероятностного метода при рассмотрении вопросов защиты информации в многоагентных системах. Предлагаемые механизмы количественного и качественного оценивания состояния отношений агентов позволяют получать агрегированные результаты для подсистем современных ИС.

## Литература

1. Рябинин И. А. Решение одной задачи оценки надежности структурно-сложной системы разными логико-вероятностными методами / И. А. Рябинин, А. В. Струков // Моделирование и анализ безопасности и риска в сложных системах, Санкт-Петербург, 19–21 июня 2019 года. – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, 2019. – С. 159–172.
2. Демин А. В. Глубокое обучение адаптивных систем управления на основе логико-вероятностного подхода / А. В. Демин // Известия Иркутского государственного университета. Серия: Математика. – 2021. – Т. 38. – С. 65–83.
3. Викторова В. С. Вычисление показателей надежности в немонотонных логико-вероятностных моделях многоуровневых систем / В. С. Викторова, А. С. Степанянц // Автоматика и телемеханика. – 2021. – № 5. – С. 106–123.
4. Леонтьев А. С. Математические модели оценки показателей надежности для исследования вероятностно-временных характеристик многомашинных комплексов с учетом отказов / А. С. Леонтьев, М. С. Тимошкин // Международный научно-исследовательский журнал. – 2023. – № 1(127). С. 1–13.
5. Пучкова Ф. Ю. Логико-вероятностный метод и его практическое использование / Ф. Ю. Пучкова // Информационные технологии в процессе подготовки современного специалиста: Межвузовский сборник научных трудов / Министерство просвещения Российской Федерации; Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Липецкий государственный педагогический университет имени П. П. Семенова-Тян-Шанского». Том Выпуск 25. – Липецк: Липецкий государственный педагогический университет имени П. П. Семенова-Тян-Шанского, 2021. – С. 187–193.
6. Россихина Л. В. О применении логико-вероятностного метода И. А. Рябинина для анализа рисков информационной безопасности / Л. В. Россихина, О. О. Губенко, М. А. Черноситова // Актуальные проблемы деятельности подразделений УИС: Сборник материалов Всероссийской научно-практической конференции, Воронеж, 20 октября 2022 года. – Воронеж: Издательско-полиграфический центр «Научная книга», 2022. – С. 108–109.
7. Карпов А. В. Модель канала утечки информации на объекте информатизации / А. В. Карпов // Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании (АПИНО 2018): VII Международная научно-техническая и научно-методическая конференция. Сборник научных статей. В 4-х томах, Санкт-Петербург, 28 февраля – 01 марта 2018 года / Под редакцией С. В. Бачевского. Том 2. – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, 2018. – С. 378–382.
8. Методика кибернетической устойчивости в условиях воздействия таргетированных кибернетических атак / Д. А. Иванов, М. А. Коцыняк, О. С. Лаута, И. Р. Мургазин // Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании (АПИНО 2018): VII Международная научно-техническая и научно-методическая конференция. Сборник научных статей. В 4-х томах, Санкт-Петербург, 28 февраля – 01 марта 2018 года / Под редакцией С. В. Бачевского. Том 2. – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, 2018. – С. 343–346.
9. Елисеев Н. И. Оценка уровня защищенности автоматизированных информационных систем юридически значимого электронного документооборота на основе логико-вероятностного метода / Н. И. Елисеев, Д. И. Тали, А. А. Обланенко // Вопросы кибербезопасности. – 2019. – № 6(34). – С. 7–16.
10. Коцыняк М. А. Математическая модель таргетированной компьютерной атаки / М. А. Коцыняк, О. С. Лаута, Д. А. Иванов // Научные технологии в космических исследованиях Земли. – 2019. – Т. 11, № 2. – С. 73–81.
11. Белякова Т. В. Функциональная модель процесса воздействия целевой компьютерной атаки / Т. В. Белякова, Н. В. Сидоров, М. А. Гудков // Радиолокация, навигация, связь: Сборник трудов XXV Международной научно-технической конференции, посвященной 160-летию со дня рождения А. С. Попова. В 6 томах, Воронеж, 16–18 апреля 2019 года. Том 2. – Воронеж: Воронежский государственный университет, 2019. – С. 108–111.
12. Калашников А. О. Применение логико-вероятностного метода в информационной безопасности (Часть 1) / А. О. Калашников, К. А. Бугайский, Д. С. Бирин, Б. О. Дерябин, С. О. Цепенда, К. В. Табаков // Вопросы кибербезопасности. – 2023. – № 4 (56). – С. 23–32.
13. Калашников А. О. Применение логико-вероятностного метода в информационной безопасности (Часть 2) / А. О. Калашников, К. А. Бугайский, Е. И. Аникина, И. С. Перескоков, Ан. О. Петров, Ал. О. Петров, Е. С. Храменкова, А. А. Молотов // Вопросы кибербезопасности. – 2023. – № 5 (57). – С. 113–127.
14. Калашников А. О. Применение логико-вероятностного метода в информационной безопасности (Часть 3) / А. О. Калашников, К. А. Бугайский, Е. И. Аникина, И. С. Перескоков, Ан. О. Петров, Ал. О. Петров, Е. С. Храменкова, А. А. Молотов // Вопросы кибербезопасности. – 2023. – № 6 (58). – С. 20–34.
15. Калашников А. О. Применение логико-вероятностного метода в информационной безопасности (Часть 4) / А. О. Калашников, Е. В. Аникина, К. А. Бугайский, Д. С. Бирин, Б. О. Дерябин, С. О. Цепенда, К. В. Табаков // Вопросы кибербезопасности. – 2024. – № 3 (61). – С. 23–32.
16. Бугайский К. А. Расширенная модель открытых систем (Часть 1) / К. А. Бугайский, Д. С. Бирин, Б. О. Дерябин, С. О. Цепенда // Информация и безопасность. – 2022. – Т. 25, № 2. – С. 169–178.
17. Бугайский К. А. Расширенная модель открытых систем (Часть 2) / К. А. Бугайский, И. С. Перескоков, А. О. Петров, А. О. Петров // Информация и безопасность. – 2022. – Т. 25, № 3. – С. 321–330.
18. Бугайский К. А. Расширенная модель открытых систем (Часть 3) / К. А. Бугайский, Б. О. Дерябин, К. В. Табаков, Е. С. Храменкова, С. О. Цепенда // Информация и безопасность. – 2022. – Т. 25, № 4. – С. 501–512.
19. Калашников А. О. Модель количественного оценивания агента сложной сети в условиях неполной информированности / А. О. Калашников, К. А. Бугайский // Вопросы кибербезопасности. – 2021. – № 6 (46). – С. 26–35.
20. Калашников А. О. Методика оценки возможности реализации информационных угроз / А. О. Калашников, К. А. Бугайский // Информация и безопасность. – 2020. Т. 23, № 2. С. 163–178.
21. Бугайский К. А. Определение успешности действий нарушителя в однородной среде / К. А. Бугайский // Проблемы управления безопасностью сложных систем: Материалы XXIX международной научно-практической конференции, Москва, 15 декабря 2021 года. – Москва: Институт проблем управления им. В. А. Трапезникова РАН, 2021. – С. 227–232.

22. Калашников А. О. Модель оценки безопасности сложной сети. (часть 1) / А. О. Калашников, К. А. Бугайский // Вопросы кибербезопасности. – 2022. – № 4 (50). – С. 26–38.
23. Калашников А. О. Модель оценки безопасности сложной сети (Часть 2) / А. О. Калашников, К. А. Бугайский, А. А. Молотов // Вопросы кибербезопасности. – 2022. – № 5 (51). – С. 47–60.
24. Бурков В. Н. Идентификация механизмов комплексного оценивания на основе унитарного кода / В. Н. Бурков, В. А. Сергеев, Н. А. Коргин // Управление большими системами: сборник трудов. – 2020. – № 87. – С. 67–85.
25. Бурков В. Н. Проблемы синтеза механизма комплексного оценивания на основе обучающего набора данных / В. Н. Бурков, Н. А. Коргин, О. Л. Марин // XIII Всероссийское совещание по проблемам управления ВСПУ-2019: Сборник трудов XIII Всероссийского совещания по проблемам управления ВСПУ-2019, Москва, 17–20 июня 2019 года / Институт проблем управления им. В. А. Трапезникова РАН. – Москва: Институт проблем управления им. В. А. Трапезникова РАН, 2019. – С. 2280–2284.
26. Бурков В. Н. Метод синтеза системы комплексного оценивания / В. Н. Бурков, И. В. Буркова, А. В. Щепкин // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника. – 2020. – Т. 20, № 4. – С. 63–73.
27. Сергеев В. А. Синтез механизмов комплексного оценивания на основе разделительной декомпозиции / В. А. Сергеев // Проблемы управления. – 2022. – № 6. – С. 3–13.
28. Казакова Е. А. Автоматизированное построение матричных процедур комплексного оценивания на основе оптимизационного подхода / Е. А. Казакова, П. Н. Курочка, А. И. Половинкина // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2010. – Т. 6, № 10. – С. 140–146.

## References

1. Rjabinin I. A. Reshenie odnoj zadachi ocenki nadezhnosti strukturno-slozhnoj sistemy raznymi logiko-verojatnostnymi metodami / I. A. Rjabinin, A. V. Strukov // Modelirovanie i analiz bezopasnosti i riska v slozhnyh sistemah, Sankt-Peterburg, 19–21 ijunja 2019 goda. – Sankt-Peterburg: Sankt-Peterburgskij gosudarstvennyj universitet ajerokosmicheskogo priborostroenija, 2019. – S. 159–172.
2. Demin A. V. Glubokoe obuchenie adaptivnyh sistem upravlenija na osnove logiko-verojatnostnogo podhoda / A.V. Demin // Izvestija Irkutskogo gosudarstvennogo universiteta. Serija: Matematika. – 2021. – Т. 38. – S. 65–83.
3. Viktorova V. S. Vychislenie pokazatelej nadezhnosti v nemonotonnyh logiko-verojatnostnyh modeljah mnogourovnevnyh sistem / V. S. Viktorova, A. S. Stepanjanc // Avtomatika i telemekhanika. – 2021. – № 5. – S. 106–123.
4. Leont'ev A. S. Matematicheskie modeli ocenki pokazatelej nadezhnosti dlja issledovanija verojatnostno-vremennyh harakteristik mnogomashinnyh kompleksov s uchetom otkazov / A. S. Leont'ev, M. S. Timoshkin // Mezhdunarodnyj nauchno-issledovatel'skij zhurnal. – 2023. – № 1(127). S. 1–13.
5. Puchkova F. Ju. Logiko-verojatnostnyj metod i ego prakticheskoe ispol'zovanie / F. Ju. Puchkova // Informacionnye tehnologii v processe podgotovki sovremennogo specialista: Mezhvuzovskij sbornik nauchnyh trudov / Ministerstvo prosveshhenija Rossijskoj Federacii; Federal'noe gosudarstvennoe bjudzhetnoe obrazovatel'noe uchrezhdenie vysshego obrazovanija «Lipeckij gosudarstvennyj pedagogičeskij universitet imeni P.P. Semenova-Tjan-Shanskogo». Tom Vypusk 25. – Lipeck: Lipeckij gosudarstvennyj pedagogičeskij universitet imeni P.P. Semenova-Tjan-Shanskogo, 2021. – S. 187–193.
6. Rossihina L. V. O primenenii logiko-verojatnostnogo metoda I.A. Rjabinina dlja analiza riskov informacionnoj bezopasnosti / L. V. Rossihina, O. O. Gubenko, M. A. Chernositova // Aktual'nye problemy dejatel'nosti podrazdelenij UIS: Sbornik materialov Vserossijskoj nauchno-praktičeskoj konferencii, Voronezh, 20 oktjabrja 2022 goda. – Voronezh: Izdatel'sko-poligrafičeskij centr «Nauchnaja kniga», 2022. – S. 108–109.
7. Karpov A. V. Model' kanala utečki informacii na ob#ekte informatizacii / A. V. Karpov // Aktual'nye problemy infotelekkommunikacij v nauke i obrazovanii (APINO 2018): VII Mezhdunarodnaja nauchno-tehnicheskaja i nauchno-metodicheskaja konferencija. Sbornik nauchnyh statej. V 4-h tomah, Sankt-Peterburg, 28 fevralja – 01 marta 2018 goda / Pod redakciej S. V. Bachevskogo. Tom 2. – Sankt-Peterburg: Sankt-Peterburgskij gosudarstvennyj universitet telekkommunikacij im. prof. M. A. Bonch-Bruevicha, 2018. – S. 378–382.
8. Metodika kibernetičeskoj ustojčivosti v uslovijah vozdejstvija targetirovannyh kibernetičeskijh atak / D. A. Ivanov, M. A. Kocynjak, O. S. Lauta, I. R. Murtazin // Aktual'nye problemy infotelekkommunikacij v nauke i obrazovanii (APINO 2018): VII Mezhdunarodnaja nauchno-tehnicheskaja i nauchno-metodicheskaja konferencija. Sbornik nauchnyh statej. V 4-h tomah, Sankt-Peterburg, 28 fevralja – 01 marta 2018 goda / Pod redakciej S.V. Bachevskogo. Tom 2. – Sankt-Peterburg: Sankt-Peterburgskij gosudarstvennyj universitet telekkommunikacij im. prof. M.A. Bonch-Bruevicha, 2018. – S. 343–346.
9. Eliseev N. I. Ocenka urovnja zashhishhennosti avtomatizirovannyh informacionnyh sistem juridicheski znachimogo jelektronnoho dokumentooborota na osnove logiko-verojatnostnogo metoda / N. I. Eliseev, D. I. Tali, A. A. Oblanenko // Voprosy kiberbezopasnosti. – 2019. – № 6(34). – S. 7–16.
10. Kocynjak M. A. Matematicheskaja model' targetirovannoj komp'juternoj ataki / M. A. Kocynjak, O. S. Lauta, D. A. Ivanov // Naukoemkie tehnologii v kosmicheskijh issledovanijah Zemli. – 2019. – Т. 11, № 2. – S. 73–81.
11. Beljakova T. V. Funkcional'naja model' processa vozdejstvija celevoj komp'juternoj ataki / T. V. Beljakova, N. V. Sidorov, M. A. Gudkov // Radiolokacija, navigacija, svjaz': Sbornik trudov XXV Mezhdunarodnoj nauchno-tehnicheskaj konferencii, posvjashhennoj 160-letiju so dnja rozhdenija A. S. Popova. V 6 tomah, Voronezh, 16–18 aprelja 2019 goda. Tom 2. – Voronezh: Voronezhskij gosudarstvennyj universitet, 2019. – S. 108–111.
12. Kalashnikov A. O. Primenenie logiko-verojatnostnogo metoda v informacionnoj bezopasnosti (Chast' 1) / A. O. Kalashnikov, K. A. Bugajskij, D. S. Birin, B. O. Derjabin, S. O. Cependu, K. V. Tabakov // Voprosy kiberbezopasnosti. – 2023. – № 4 (56). – S. 23–32.
13. Kalashnikov A. O. Primenenie logiko-verojatnostnogo metoda v informacionnoj bezopasnosti (Chast' 2) / A. O. Kalashnikov, K. A. Bugajskij, E. I. Anikina, I. S. Pereskokov, An. O. Petrov, Al. O. Petrov, E. S. Hramchenkova, A. A. Molotov // Voprosy kiberbezopasnosti. – 2023. – № 5 (57). – S. 113–127.
14. Kalashnikov A. O. Primenenie logiko-verojatnostnogo metoda v informacionnoj bezopasnosti (Chast' 3) / A. O. Kalashnikov, K. A. Bugajskij, E. I. Anikina, I. S. Pereskokov, An. O. Petrov, Al. O. Petrov, E. S. Hramchenkova, A. A. Molotov // Voprosy kiberbezopasnosti. – 2023. – № 6 (58). – S. 20–34.

15. Kalashnikov A. O. *Primenenie logiko-verojatnostnogo metoda v informacionnoj bezopasnosti (Chast' 4)* / A. O. Kalashnikov, E. V. Anikina, K. A. Bugajskij, D. S. Birin, B. O. Derjabin, S. O. Cependa, K. V. Tabakov // *Voprosy kiberbezopasnosti*. – 2024. – № 3 (61). – S. 23–32.
16. Bugajskij K. A. *Rasshirennaja model' otkrytyh sistem (Chast' 1)* / K. A. Bugajskij, D. S. Birin, B. O. Derjabin, S. O. Cependa // *Informacija i bezopasnost'*. – 2022. – T. 25, № 2. – S. 169–178.
17. Bugajskij K. A. *Rasshirennaja model' otkrytyh sistem (Chast' 2)* / K. A. Bugajskij, I. S. Pereskokov, A. O. Petrov, A. O. Petrov // *Informacija i bezopasnost'*. – 2022. – T. 25, № 3. – S. 321–330.
18. Bugajskij K. A. *Rasshirennaja model' otkrytyh sistem (Chast' 3)* / K. A. Bugajskij, B. O. Derjabin, K. V. Tabakov, E. S. Hramchenkova, S. O. Cependa // *Informacija i bezopasnost'*. – 2022. – T. 25, № 4. – S. 501–512.
19. Kalashnikov A. O. *Model' kolichestvennogo ocenivanja agenta slozhnoj seti v uslovijah nepolnoj informirovannosti* / A. O. Kalashnikov, K. A. Bugajskij // *Voprosy kiberbezopasnosti*. – 2021. – № 6 (46). – S. 26–35.
20. Kalashnikov A. O. *Metodika ocenki vozmozhnosti realizacii informacionnyh ugroz* / A. O. Kalashnikov, K. A. Bugajskij // *Informacija i bezopasnost'*. – 2020. T. 23, № 2. S. 163–178.
21. Bugajskij K. A. *Opređenje uspešnosti dejstvij narušitelja v odnorodnoj srede* / K. A. Bugajskij // *Problemy upravlenija bezopasnost'ju slozhnyh sistem: Materialy XXIX mezhdunarodnoj nauchno-praktičeskoj konferencii, Moskva, 15 dekabrja 2021 goda*. – Moskva: Institut problem upravlenija im. V. A. Trapeznikova RAN, 2021. – S. 227–232.
22. Kalashnikov A. O. *Model' ocenki bezopasnosti slozhnoj seti. (chast' 1)* / A. O. Kalashnikov, K. A. Bugajskij // *Voprosy kiberbezopasnosti*. – 2022. – № 4 (50). – S. 26–38.
23. Kalashnikov A. O. *Model' ocenki bezopasnosti slozhnoj seti (Chast' 2)* / A. O. Kalashnikov, K. A. Bugajskij, A. A. Molotov // *Voprosy kiberbezopasnosti*. – 2022. – № 5 (51). – S. 47–60.
24. Burkov V. N. *Identifikacija mehanizmov kompleksnogo ocenivanja na osnove unitarnogo koda* / V. N. Burkov, V. A. Sergeev, N. A. Korgin // *Upravlenie bol'shimi sistemami: sbornik trudov*. – 2020. – № 87. – S. 67–85.
25. Burkov V. N. *Problemy sinteza mehanizma kompleksnogo ocenivanja na osnove obučajushhego nabora dannyh* / V. N. Burkov, N. A. Korgin, O. L. Marin // *XIII Vserossijskoe soveshhanie po problemam upravlenija VSPU-2019: Sbornik trudov XIII Vserossijskogo soveshhanija po problemam upravlenija VSPU-2019, Moskva, 17–20 ijunja 2019 goda* / Institut problem upravlenija im. V. A. Trapeznikova RAN. – Moskva: Institut problem upravlenija im. V. A. Trapeznikova RAN, 2019. – S. 2280–2284.
26. Burkov V. N. *Metod sinteza sistemy kompleksnogo ocenivanja* / V. N. Burkov, I. V. Burkova, A. V. Shhepkina // *Vestnik Juzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Serija: Komp'juternye tehnologii, upravlenie, radioelektronika*. – 2020. – T. 20, № 4. – S. 63–73.
27. Sergeev V. A. *Sintez mehanizmov kompleksnogo ocenivanja na osnove razdelitel'noj dekompozicii* / V. A. Sergeev // *Problemy upravlenija*. – 2022. – № 6. – S. 3–13.
28. Kazakova E. A. *Avtomatizirovanoe postroenie matrichnyh procedur kompleksnogo ocenivanja na osnove optimizacionnogo podhoda* / E. A. Kazakova, P. N. Kurochka, A. I. Polovinkina // *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tehničeskogo universiteta*. – 2010. – T. 6, № 10. – S. 140–146.

