

УДК 621.395.622

doi: 10.53816/23061456\_2025\_11–12\_87

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ УПРАВЛЕНИЯ МНОЖЕСТВЕННЫМ ДОСТУПОМ  
К ШИРОКОПОЛОСНОЙ СЕТИ СПУТНИКОВОЙ СВЯЗИ НА ОСНОВЕ  
ИТЕРАТИВНОЙ ОЦЕНКИ ВЕРОЯТНОСТИ ВЕЩАНИЯ АБОНЕНТОВ**

**IMPROVING MULTIPLE ACCESS MANAGEMENT TO A BROADBAND  
SATELLITE COMMUNICATIONS NETWORK BASED ON AN ITERATIVE  
ESTIMATION OF THE SUBSCRIBERS' BROADCAST PROBABILITY**

*М.С. Парфенов, В.А. Фукалов, А.А. Безкоровайный*

*M.S. Parfenov, V.A. Fukalov, A.A. Bezkorovainyi*

*Военная академия связи им. С.М. Буденного*

Рассмотрена актуальная задача повышения эффективности управления доступом абонентов к широкополосной сети спутниковой связи (ШССС) в условиях массовой одновременной активации терминалов. Рассмотрена задача увеличения временных параметров установления соединения при входе в сеть при большом числе коллизий, при ограниченном количестве слотов, выделяемых для подключения новых устройств. Предложен новый механизм доступа в сеть, основанный на адаптивном перераспределении ресурсов за счет итеративной оценки числа одновременно входящих терминалов и динамического расчета вероятности передачи данных каждым из них. Полученные результаты имеют практическую значимость для модернизации существующих и разработки перспективных систем спутниковой связи военного назначения, ориентированных на поддержку автономных и роботизированных средств в условиях сетецентрической войны.

**Ключевые слова:** сеть спутниковой связи, управление доступом, абоненты, адаптивное распределение ресурсов, функция предсказания.

The current task of increasing the efficiency of controlling subscribers' access to the broadband satellite communications network (BSCN) in conditions of mass simultaneous activation of terminals is considered. The problem of increasing the time parameters for establishing a connection at the entrance to the network with a large number of collisions and a limited number of slots allocated for connecting new devices is considered. A new network access mechanism based on adaptive resource redistribution is proposed by iteratively estimating the number of simultaneous incoming terminals and dynamically calculating the probability of data transmission by each of them. The results obtained are of practical importance for the modernization of existing and the development of promising military satellite communication systems focused on supporting autonomous and robotic assets in a network-centric war.

**Keywords:** satellite communication network, access control, subscribers, adaptive resource allocation, prediction function.

## Введение

За последние годы наблюдается активное проявление основных признаков «сетевцентрической войны», заключающихся в широкой возможности использования географически распределенной силы, непрерывном отслеживании положения всех наземных подвижных и стационарных объектов на всем театре военных действий, применении «знаний», полученных от всеохватывающего наблюдения за боевым пространством и расширенного понимания намерений командования противоборствующей стороны, наличии достаточно эффективных, построенных на единых принципах управления средств каналообразования и телекоммуникации между объектами (субъектами), выполняющими боевые задачи [2, 9].

Своевременность и интенсивность обмена данными в ШССС становятся одними из важнейших задач, к которым предъявляется широкий ряд требований. При этом становится актуальным решение задачи повышения своевременности доставки сообщений путем оптимизации управления доступом к сети [4].

На физическом и канальном уровнях подобные сети уже сегодня оснащены множеством отработанных технологий, обеспечивающих высокую помехоустойчивость и эффективность передачи данных [8]. Однако на сетевом уровне, особенно в части управления множественным доступом, сохраняется ряд недостатков, связанных с неэффективным распределением ограниченных ресурсов канала при массовом одновременном подключении терминалов. В условиях боевых действий, где каждая секунда имеет стратегическое значение, задержки при установлении соединения могут привести как к срыву выполнения боевых задач, так и к потере контроля и управления над отдельными элементами системы.

В связи с этим особую значимость приобретает разработка и внедрение адаптивных механизмов управления доступом, способных оперативно реагировать на изменение количества активных и неактивных корреспондентов и обеспечивать своевременное подключение новых терминалов к сети без значительного роста коллизий и временных затрат.

Таким образом, статья посвящена исследованию и совершенствованию подсистемы управ-

ления доступом, ориентированной на динамическую оценку числа входящих терминалов и адаптивное перераспределение ресурсов в процессе функционирования сети.

Актуальность работы обусловлена взаимосвязанными факторами, определяющими вектор развития современных Вооруженных сил. Во-первых, прогнозируется значительный рост количества роботизированных и беспилотных систем, задействованных в специальных операциях. Эти средства, как правило, функционируют в составе распределенных группировок и требуют постоянного обмена данными с командными пунктами и между собой. Во-вторых, в условиях высокой интенсивности боевых действий возможны массовые одновременные активации ранее неактивных терминалов, например, при переходе из режима ожидания к выполнению специальных задач или при восстановлении связи после ее временного нарушения. В таких сценариях традиционные протоколы множественного доступа (например, ALOHA или его модификации) демонстрируют крайне низкую эффективность из-за резкого роста коллизий в ограниченном числе слотов, выделяемых для входа новых терминалов [1, 6].

Особенно остро этот фактор проявляется в архитектурах спутниковых сетей с фиксированной структурой кадра, где ресурсы на вход новых пользователей выделяются заранее и в минимальном объеме [10]. При этом ни терминалы, ни центральный узел (хаб) не обладают априорной информацией о количестве одновременно активирующихся устройств, что делает невозможным оптимальное планирование доступа. В результате среднее время установления соединения может возрастать в разы, что противоречит требованиям к своевременности и надежности управления в современных военных системах [11].

Следовательно, разработка адаптивных механизмов управления доступом, способных в реальном времени оценивать нагрузку и динамически корректировать параметры передачи данных (в частности — вероятность инициации передачи), становится крайне необходимой мерой повышения боевой эффективности и устойчивости всей системы связи. Это особенно важно в контексте десятилетней перспективы развития Вооруженных сил, где предполагается массовое внедрение

интеллектуальных, самоорганизующихся и автономных систем, требующих гибкой и масштабируемой инфраструктуры связи.

Цель работы — исследование и совершенствование подсистемы управления множественным доступом абонентов к широкополосной сети спутниковой связи, основанной на адаптивном перераспределении ресурсов в процессе функционирования. Предлагаемый подход позволит ввести механизм итеративной оценки числа одновременно входящих терминалов на стороне каждого устройства с последующим динамическим расчетом вероятности передачи в слоте входа. В результате решения данной задачи, количество коллизий, полученных за счет приближения математического ожидания числа передающих терминалов к количеству доступных слотов будет минимальным.

В рамках работы также ставится задача сравнительного анализа различных функций предсказания числа активных терминалов — от линейных до степенных (с точки зрения скорости сходимости, устойчивости к переоценке нагрузки и общей эффективности подключения). Особое внимание уделяется двухэтапной стратегии: на первом этапе обеспечивается максимально быстрое получение хотя бы одним терминалом слота для передачи информации хабу о предсказанной нагрузке; на втором — осуществляется массовое подключение всех терминалов при скорректированном числе выделенных слотов.

### Механизм итеративного предсказания нагрузки для снижения коллизий при входе в сеть

В ситуациях (стационарных), когда основная часть кадра занята активными терминалами для вещания, для входа неактивных терминалов выделяется минимум слотов. В этом случае при одновременной (или почти одновременной) активации большого количества терминалов из числа неактивных необходимо избежать большого числа «коллизий» при малом числе выделенных под вход слотов. Как следствие, в системе будет наблюдаться резкое увеличение времени входа каждого отдельного терминала, причем неограниченное.

Одной из основных причин возникновения рассмотренной ситуации является неполная ин-

формативность каждой из сторон общего числа одновременно входящих терминалов [3].

Для решения данной задачи в статье предлагается модифицировать существующую подсистему управления множественного доступа [5] (рис. 1) путем добавления оценки в слот для входа вероятности вещания каждого терминала. Цель модификации заключается в том, чтобы позволить каждому терминалу итеративно оценивать вероятности вещания и, тем самым, приближаться к реальному числу одновременно входящих терминалов. Такой подход позволит вычислять вероятность собственного вещания в реальном режиме времени. Главным признаком того, что предсказанное число является верным или хотя бы приблизительно верным (находится в некоторой малой окрестности искомого числа), является событие, при котором терминал успешно занял слот для входа. Данная вероятность вещания вычисляется исходя из условия: ожидаемое число вещающих терминалов должно с максимальной эффективностью занимать все слоты для входа.

Исходя из таких условий, задача модификации подсистемы управления множественного доступа через вероятность вещания и вероятность не вещания сводится к получению итогового числа вещающих терминалов, которое будет

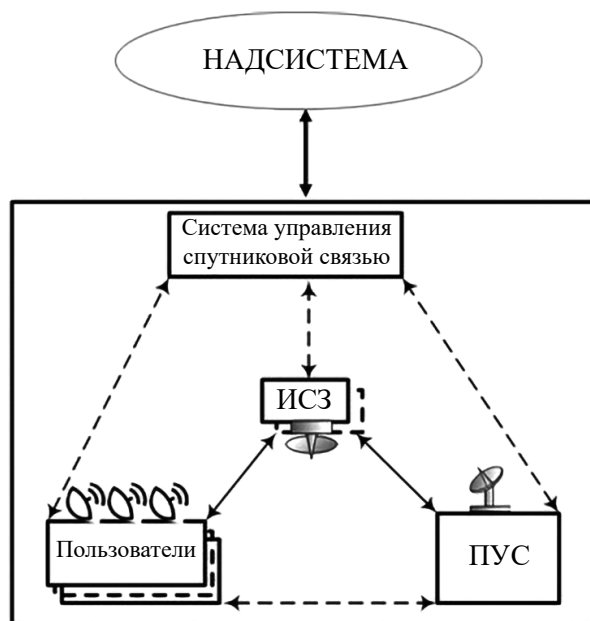


Рис. 1. Существующая подсистема управления множественного доступа

приближаться к биномиальному распределению (распределение не будет полностью соответствовать биномиальному, так как предсказания числа одновременно входящих терминалов, на которых будет основан расчет вероятности вещания, могут быть неодинаковы для каждого отдельного терминала, но в силу признака остановки, они будут к нему сходиться).

Поэтому оценка общего числа вещающих терминалов  $n$  может быть выражена через математическое ожидание биномиального распределения:

$$E(n) = p_{\text{вещ}} \cdot N,$$

где  $p_{\text{вещ}}$  — вероятность вещания терминала, а  $N$  — общее число терминалов, которые одновременно пытаются войти в сеть.

Максимальное число терминалов, удачно занявших слот для входа, достигается тогда, когда число одновременно вещающих терминалов равняется числу выделенных под вход слотов [7, 8]. Следовательно, для максимальной эффективности входа терминалов в сеть математическое ожидание числа вещающих терминалов должно равняться числу  $K$  выделенных под вход слотов:

$$E(n) = K;$$

$$p_{\text{вещ}} \cdot N = K.$$

Значит, оценка вероятности вещания каждого из терминалов должна со временем стремиться к числу:

$$p_{\text{вещ}} = \frac{K}{N}.$$

Это приводит к следующей общей формуле для вероятности вещания:

$$p_{\text{вещ}} = \frac{K}{N_{\text{пред}}(f)},$$

где  $N_{\text{пред}}(f)$  — функция предсказания числа одновременно входящих терминалов, зависящая от  $f$  — количества кадров, в которые функция не смогла занять слот для входа.

При этом эта функция должна удовлетворять следующим условиям:

$$\lim_{f \rightarrow \infty} (N_{\text{пред}}(f)) = N;$$

$$N_{\text{пред}}(f) \geq K, \quad \forall f \geq 0.$$

При выборе функции предсказания числа одновременно входящих терминалов первым делом необходимо рассмотреть функцию линейного роста от  $f$ , где  $f$  — число кадров, в которые терминал вещал, но не смог занять слот:

$$N_{\text{пред}}(f) = K + f.$$

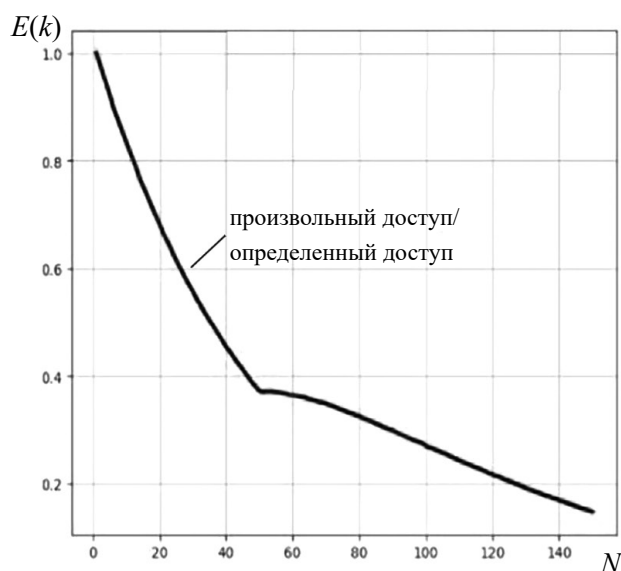
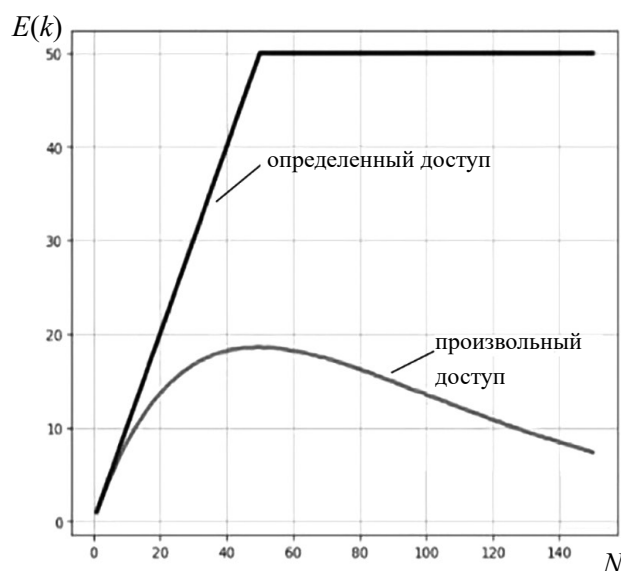


Рис. 2. Графики зависимости количества терминалов, занявших слот от общего количества

Минусами данной функции является долгая сходимость и «скатывание» влево с экстремума графика функции (обозначена как «произвольный доступ»), из-за коллизий, которые могут возникать даже при верном предсказании количества одновременно вещающих терминалов  $N$  (рис. 2).

Улучшить сходимость можно, если сделать зависимость от  $f$  не линейной, а, например, квадратичной:

$$N_{\text{пред}}(f) = K + f^2.$$

Минусом функции является более сильное «скатывание» влево с экстремума, из-за тех же коллизий и возможной переоценки числа одновременно вещающих терминалов  $N$ .

При сравнении скорости входа терминалов в сеть для двух разных функций предсказания числа одновременно входящих терминалов построим зависимость количества кадров, требуемых для получения одного слота одним терминалом при одновременном входе  $N$  терминалов, от  $K$  — количества выделенных под вход слотов.

Анализ этого показателя является важной частью оценки функции предсказания, так как при получении терминалом слота под вход появляется возможность сообщить хабу информацию о предсказанном числе одновременно входящих терминалов. Эта информация должна быть использована хабом для корректного выделения слотов под вход.

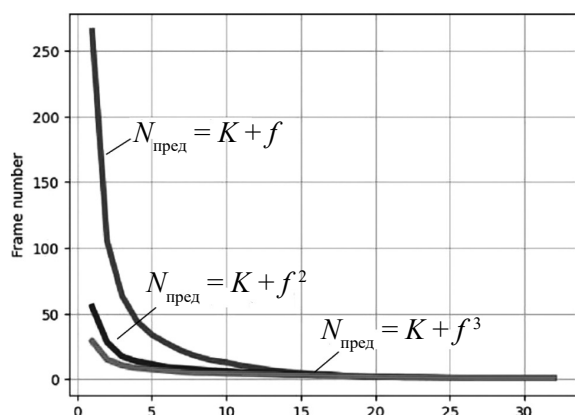


Рис. 3. Количество кадров необходимое для входа одного терминала в сеть при  $K$  выделенных слотах ( $N = 100$ )

Как видно из графиков высокостепенные функции предсказания очень быстро сходятся к достаточной вероятности вещания для каждого терминала, чтобы один из них смог получить свой первый слот и смог сообщить хабу предсказанное число одновременно входящих терминалов.

Далее построим зависимость количества кадров, требуемых для одновременного входа  $N$  терминалов, от  $K$  — количества выделенных под вход слотов. Будем считать, что для входа терминалам требуется успешно занять один слот (рис. 5).

Функция, обозначенная на графике как  $N_{\text{пред}} = \text{точн. знач.}$ , обозначает поведение, при котором каждый терминал точно знает количество вещающих терминалов в каждый момент времени. Эта функция выступает здесь в роли эталона. Чем ближе будет выбранная функция предсказания к эталону, тем она лучше.

Из графика несложно видеть минус высокостепенных функций — сильная переоценка числа одновременно вещающих терминалов. Также можно увидеть, что функция предсказания квадратичной зависимости не сильно подвержена переоценке и при этом позволяет ощутимо быстрее получить первый слот, в сравнении с функцией предсказания линейной зависимости.

Совершенствование подсистемы управления доступом заключается в выборе различных функций предсказания в зависимости от этапов входа. Есть два важных этапа: первый — получение первого слота для передачи информации

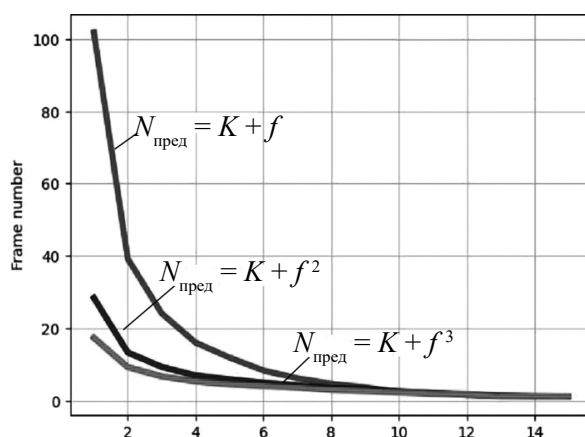


Рис. 4. Количество кадров необходимое для входа одного терминала в сеть при  $K$  выделенных слотах ( $N = 50$ )

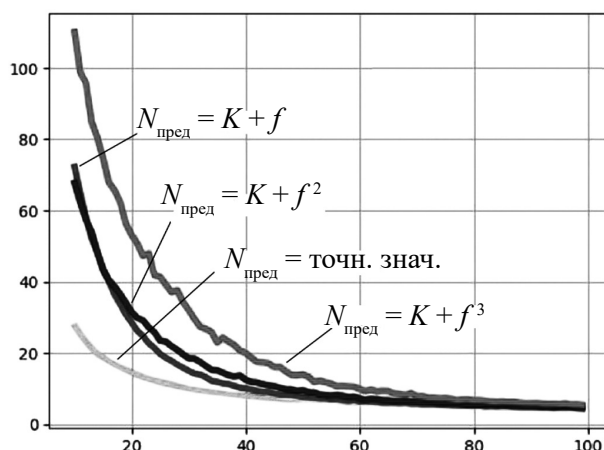


Рис. 5. Количество кадров необходимое для входа одного терминала в сеть при  $K$  выделенных слотах

хабу предсказанного числа одновременно входящих терминалов и второй — вход всех терминалов во время скорректированного хабом числа слотов для входа. Из проведенного исследования видно, что на первом этапе необходимо выбирать функции быстрого роста числа одновременно входящих терминалов (целесообразно степенные), а на втором — функции умеренного роста, как правило, линейные.

### Выводы

Анализ существующей подсистемы управления доступом приводит к выводу, что в условиях резкого увеличения числа абонентов, участвующих в боевых действиях, и их зависимости от единого информационно-телекоммуникационного пространства, обеспечение своевременного и надежного доступа к широкополосной сети спутниковой связи становится критически важной задачей. Традиционные протоколы множественного доступа, основанные на фиксированном выделении минимального числа слотов для входа новых терминалов, демонстрируют крайне низкую эффективность при массовой одновременной активации неактивных устройств, что приводит к значительному росту коллизий и неограниченному увеличению времени установления соединения.

Авторы пришли к выводу, что ключевой причиной данного аспекта является отсутствие у терминалов и центрального узла априорной информации о количестве одновременно входящих

корреспондентов. В ответ на это в работе предложен новый механизм управления доступом, основанный на итеративной оценке числа активизирующихся терминалов и динамическом расчете вероятности передачи каждым из них. Такой подход позволяет приблизить математическое ожидание числа передающих устройств к количеству доступных слотов, тем самым максимизируя эффективность их использования и минимизируя число коллизий.

Результаты проведенного исследования показывают, что выбор функции предсказания числа одновременно входящих терминалов оказывает существенное влияние как на скорость получения первого слота (для передачи информации хабу), так и на общую эффективность массового подключения. В частности, установлено, что функции с быстрым ростом (например, степенные) целесообразно использовать на начальном этапе для оперативного установления связи хотя бы с одним терминалом, в то время как на этапе массового входа предпочтительны функции умеренного роста (например, линейные или квадратичные), которые снижают риск переоценки нагрузки и обеспечивают более стабильную сходимость к оптимальному значению.

### Список источников

1. Чуднов А.М. Математические основы моделирования, анализа и синтеза систем. СПб: Военная академия связи им. С.М. Буденного, 2021. 193 с.
2. Кондратьев А.Е. Будущее сетецентрических войн // Независимое военное обозрение. 2022. № 36. С. 14.
3. Промежуточный отчет о НИР «Байбуз-ВПД-ВНС». М.: ФГБУ «16 ЦНИИИ» Минобороны России, 2022. 146 с.
4. Зинкин С.В., Мурсаев А.Н. Особенности многостанционного доступа с временным разделением каналов в системах спутниковой связи // Труды учебных заведений связи. 2020. Т. 6, № 1. С. 22–31.
5. Daniel Minoli. Innovations in satellite communication and satellite technology: the industry implications of DVB-S2X, high throughput satellites, Ultra HD, M2M, and IP. Published by John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, 2015. P. 21.

6. Abramson N. The ALOHA System — Another Alternative for Computer Communications // AFIPS Conference Proceedings. 1970. Vol. 37. Pp. 281–285.

7. Zheng L., Tse D. Diversity and Multiplexing: A Fundamental Tradeoff in Multiple-Antenna Channels // IEEE Transactions on Information Theory. 2003. Vol. 49, No 5. Pp. 1073–1096.

8. Sklar B. Digital Communications: Fundamentals and Applications. 2nd ed. Prentice Hall, 2001. 1104 p.

9. Alberts D.S., Garstka J.J., Stein F.P. Network Centric Warfare: Developing and Leveraging Information Superiority. 2nd ed. Washington, DC: CCRP Publication Series, 2000. 238 p.

10. Giambene G. Random Access for Satellite Communications: A Survey // IEEE Communications Surveys & Tutorials. 2021. Vol. 23, No 2. Pp. 1083–1112.

11. Рыжов Г.Б., Вдовенко Г.В. К вопросу о боевой устойчивости системы управления группировкой войск (сил) в операции // Известия Российской Академии Ракетных и Артиллерийских Наук. 2025. № 3 (138). С. 3–12.

## References

1. Chudnov A.M. Mathematical foundations of modeling, analysis and synthesis of systems. SPb: VAS, 2021. 193 p.

2. Kondratiev A.E. The Future of network-centric Wars, *Nezavisimoe voennoe obozrenie*. 2022. No 36. P. 14.

3. Interim research report «Baybuz-VPD-VNS». Moskva: FGBU «16 CNIII» Russian Ministry of Defense, 2022.

4. Zinkin S.V., Mursaev A.N. Features of multi-station access with temporary channel separation in satellite communication systems // *Trudi uchebnykh zavedeniy svyazi*. 2020. Vol. 6. No 1. Pp. 22–31.

5. Daniel Minoli. Innovations in satellite communication and satellite technology: the industry implications of DVB-S2X, high throughput satellites, Ultra HD, M2M, and IP. Published by John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, 2015. P. 21.

6. Abramson N. The ALOHA System — Another Alternative for Computer Communications // AFIPS Conference Proceedings. 1970. Vol. 37. Pp. 281–285.

7. Zheng L., Tse D. Diversity and Multiplexing: A Fundamental Tradeoff in Multiple-Antenna Channels // IEEE Transactions on Information Theory. 2003. Vol. 49, No. 5. Pp. 1073–1096.

8. Sklar B. Digital Communications: Fundamentals and Applications. 2nd ed. Prentice Hall, 2001. 1104 p.

9. Alberts D.S., Garstka J.J., Stein F.P. Network Centric Warfare: Developing and Leveraging Information Superiority. 2nd ed. Washington, DC: CCRP Publication Series, 2000. 238 p.

10. Giambene G. Random Access for Satellite Communications: A Survey // IEEE Communications Surveys & Tutorials. 2021. Vol. 23, No 2. Pp. 1083–1112.

11. Rizkov G.B., Vdovenko G.V. On the issue of combat stability of the command and control system of the grouping of troops (forces) in the operation // *Izvestiya Rossiyskoy Akademii Raketnih i Artileriyevykh Nauk*. 2025. No 3 (138). Pp. 3–12.