

Для генералов, адмиралов и офицеров
Вооруженных Сил Российской Федерации



ВОЕННАЯ МЫСЛЬ

Военная мысль 2022 № 6 июнь

6

2 0 2 2



К вопросу повышения эффективности противодействия малоразмерным беспилотным летательным аппаратам

Майор МАРИАМ МОХАММАД

Полковник В.Н. ПОХВАЩЕВ,
кандидат технических наук

Подполковник Л.Б. РЯЗАНЦЕВ,
доктор технических наук

АННОТАЦИЯ

Рассмотрены вопросы повышения эффективности противодействия малоразмерным воздушным целям средствами противовоздушной обороны за счет увеличения дальности их радиолокационного обнаружения с использованием радиолокационных станций, размещаемых на беспилотных летательных аппаратах малого класса и мультикоптерах.

ABSTRACT

The paper explores the issues of improving the efficiency of countering miniature air targets by air defense assets thanks to a greater range of their radar detection involving radar stations mounted on small-class unmanned aerial vehicles and multicopters.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

Противодействие малоразмерным воздушным целям, беспилотные летательные аппараты, радиолокационная станция, теория массового обслуживания.

KEYWORDS

Countering miniature air targets, unmanned aerial vehicles, radar station, mass servicing theory.

ВОЕННЫЕ конфликты последних лет, как локальные (Нагорный Карабах и др.), так и имеющие международный масштаб (Сирийская Арабская Республика, Специальная операция ВС РФ по защите Донецкой и Луганской Народных республик и др.), принимают все более нетривиальный характер, в первую очередь за счет применения новых видов высокоточного вооружения. И сегодня уже ни один военный конфликт практически не обходится без массированного применения беспилотных летательных аппаратов (БПЛА), способных точно уничтожить важные объекты, ликвидировать лидеров террористических групп, оказывать негативное влияние на моральное состояние личного состава воюющих сторон и в целом определять ход и исход военных действий¹.

Если до недавнего времени основными задачами БПЛА были ведение воздушной разведки, то существен-

ное повышение их автономности, расширение возможностей бортового радиоэлектронного оборудования

и номенклатуры малогабаритных боеприпасов привели к созданию малоразмерных ударных БПЛА, барражирующих боеприпасов (БПЛА-камикадзе), обладающих значительной дальностью действия (сотни километров) и продолжительным временем полета (до 5—7 часов и более)².

Преимущество малоразмерных БПЛА заключается в их низкой радиолокационной заметности, эффективная отражающая поверхность которых не превышает десятых долей квадратного метра, и способности выполнять большую часть боевого полета в режиме полного радиомолчания. В результате складывается ситуация, когда БПЛА способен обнаруживать цели на дальностях, превышающих дальности их обнаружения существующими средствами и комплексами радиолокационной (ЗРПК «Панцирь-С1», РЛС «Гармонь», «Радескан») и радиотехнической («Репеллент-1», Р-330Ж «Житель» и др.) разведки, что существенно повышает вероятность преодоления ими зоны ПВО противника и способствует увеличению вероятности выполнения боевой задачи. Малая радиолокационная заметность в сочетании с относительно невысокой стоимостью и массовостью обуславливают высокую эффективность применения БПЛА для решения разведывательных, ударных и других специальных задач.

Эффективность применения малоразмерных БПЛА может быть оценена по величине приведенной стоимости выполнения боевой задачи³

$$C_{пбз} = C_{бз} / P_{бз} \quad (1)$$

где: $C_{бз} = N_{пот} C_{БПЛА} + C_{бп} + N_{БПЛА} C_{об}$;
 $N_{пот}$ и $N_{БПЛА}$ — количество потерянных и используемых БПЛА при выполнении боевой задачи соответственно;

$C_{БПЛА}$ — стоимость одного БПЛА;
 $C_{бп}$ — стоимость израсходованных боеприпасов;

$C_{об}$ — стоимость обеспечения применения БПЛА (стоимость обслуживания, горюче-смазочных материалов и др.);

$P_{бз}$ — вероятность выполнения боевой задачи.

Несмотря на то что вероятность выполнения боевой задачи одним БПЛА $P_{бз1}$ может быть не велика, массовое их применение обеспечивает достижение требуемого значения вероятности выполнения боевой задачи, определяемое выражением:

$$P_{бз} = (1 - P_{бз1})^{N_{БПЛА}} \quad (2)$$

В свою очередь, вероятность выполнения боевой задачи отдельным БПЛА является произведением вероятностей выполнения этапов боевого задания

$$P_{бз1} = P_{ПВО} P_{нав} P_{прим}, \quad (3)$$

где: $P_{ПВО}$ — вероятность преодоления БПЛА зоны ПВО противника;

$P_{нав}$ — вероятность наведения БПЛА на цель (выход в заданный район);

$P_{прим}$ — вероятность успешного применения БПЛА (для разведывательных — вероятность обнаружения, для ударных — вероятность поражения цели).

Анализ выражений (1) и (2) показывает, что, даже несмотря на невысокую вероятность выполнения боевой задачи одним БПЛА, их массовое применение при невысокой стоимости как самого БПЛА, так и его обслуживания обеспечивает высокую эффективность их применения.

Высокая эффективность применения БПЛА привела к тому, что в противоборстве между ними и комплексами ПВО объектами поражения становятся уже последние. Количество уничтоженных комплексов ПВО, приходящихся на один уничтоженный БПЛА, постоянно увеличивается. Так, если в военном конфликте

К ВОПРОСУ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОТИВОДЕЙСТВИЯ МАЛОРАЗМЕРНЫМ БЕСПИЛОТНЫМ ЛЕТАТЕЛЬНЫМ АППАРАТАМ

в Сирийской Арабской Республике (2017—2019) на один уничтоженный зенитный ракетно-пушечный комплекс (ЗРПК) приходилось в среднем пять уничтоженных БПЛА, то в Ливии (2019) — 2—3, в Нагорном Карабахе (2020) в среднем 2,25 ЗРПК⁴. Наблюдаются ситуации, когда группы БПЛА становятся эффективным средством поражения наземных объектов и завоевания господства в воздухе. Именно поэтому необходимо обоснование новых способов повышения эффективности противодействия группам малоразмерных БПЛА.

Основными способами противодействия БПЛА, обеспечивающими снижение вероятности выполнения ими боевых задач, на сегодняшний день являются: уничтожение их ракетно-пушечным вооружением ЗРПК и радиоэлектронное подавление систем и каналов управления средствами радиоэлектронного подавления (РЭП). Отражение массированного налета БПЛА средствами ЗРПК экономически нецелесообразно из-за использования дорогостоящих ракет по большому числу относительно дешевых БПЛА⁵ и быстрому исчерпанию пушечного боекомплекта, что может привести к последующей неспособности отражения основного удара эшелонами крылатых ракет и оперативно-тактической авиации.

В ряде случаев предпочтительным по соотношению затрат к достигаемому результату можно считать применение средств РЭП для блокирования каналов управления БПЛА и приемников глобальной спутниковой навигационной системы (СНС). Однако применение на БПЛА адаптивных антенных решеток в составе приемников СНС, повышение точности бортовых бесплатформенных инерциальных навигационных систем, установка малогабаритных оптических и радиолокационных датчиков, реализующих относительные и кор-

реляционно-экстремальные способы автономной навигации, снижают дальность действия и эффективность применения средств РЭП.

Существуют и другие экспериментальные способы противодействия БПЛА. Однако они на сегодняшний день не являются массовыми и пока обладают низкой эффективностью.

В скором будущем с развитием технологий искусственного интеллекта, направленных на реализацию полной автономности действий БПЛА в составе роя с самостоятельным поиском целей и принятием решения по их уничтожению, адаптивному изменению поведения в зависимости от складывающейся обстановки, противодействовать им будет все сложнее и сложнее.

Одним из подходов, направленных на повышение эффективности противодействия БПЛА при относительно невысоких затратах может являться размещение малогабаритных средств радиолокации на БПЛА самолетного и мультикоптерного типа для увеличения дальности обнаружения малоразмерных воздушных целей в 2—3 раза как за счет выноса средства обнаружения, так и за счет увеличения высоты подъема антенны. Дополнительное увеличение дальности обнаружения может быть достигнуто за счет реализации бистатических методов радиолокации. При таком подходе на БПЛА размещается только приемная часть, а передающая часть на подъемных антенных мачтах. БПЛА осуществляют дежурство в зонах на угрожаемых направлениях (рис. 1), а передающие устройства, размещенные на антенных мачтах, осуществляют подсвет зоны разведки с охраняемых позиций.

Повышение эффективности противодействия может достигаться за счет реализации методов идентификации и распознавания целей, например, на основе анализа структуры отраженного сигнала и характеристик

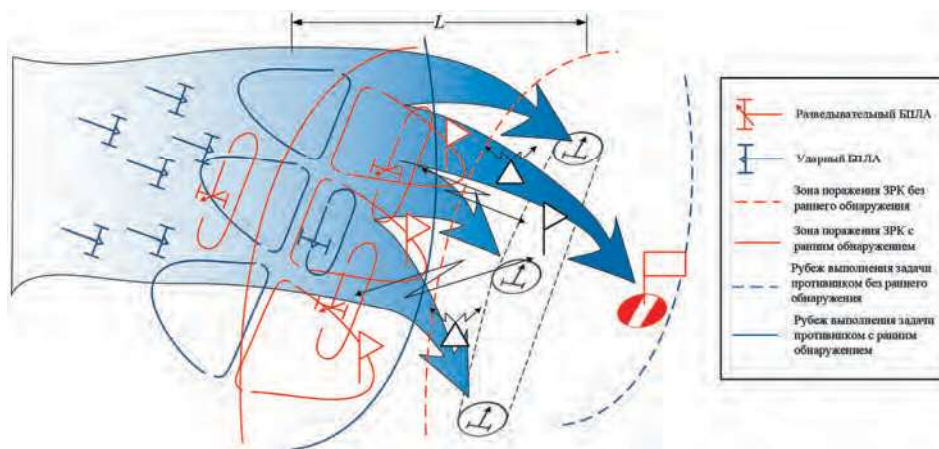


Рис. 1. Вариант применения БПЛА со средствами радиолокации при отражении налета групп БПЛА противника

траекторий полета. Идентификация целей обеспечит снижение загрузки целевых каналов средств ПВО и более рациональное их использование.

При размещении средств радиолокации на БПЛА самолетного типа достигается вынесение зоны обзора с наибольшим удалением от прикрываемых рубежей, при размещении их на БПЛА мультикоптерного типа обеспечивается более длительное нахождение в воздухе (например, при подаче питающих напряжений

по кабелю), а также повышается эффективность обнаружения воздушных целей на фоне пассивных помех от местных предметов из-за неподвижности носителя РЛС в режиме зависания. На рисунке 2 представлен вариант размещения малогабаритной РЛС, разработанной ВУНЦ ВВС «ВВА» (г. Воронеж) совместно с АО «Радар ммс» (г. Санкт-Петербург), на мультикоптере DJI Matrice 600 Pro и БПЛА «Феникс» (ООО «НПП «НТТ», г. Санкт-Петербург).



Рис. 2. Вариант размещения РЛС на БПЛА мультикоптерного и самолетного типа

Для оценки эффективности средств противодействия БПЛА с использованием малогабаритных средств радиолокации можно использовать критерий, характеризующий разницу между

стоимостью предотвращенного ущерба от налета БПЛА Спу и затратами на противодействие им Спд, т. е.

$$\Theta_{\text{нд}} = C_{\text{спу}} - C_{\text{спд}}. \quad (4)$$

К ВОПРОСУ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОТИВОДЕЙСТВИЯ МАЛОРАЗМЕРНЫМ БЕСПИЛОТНЫМ ЛЕТАТЕЛЬНЫМ АППАРАТАМ

С позиций теории массового обслуживания величина предотвращенного ущерба в единицу времени будет определяться интенсивностью потока пораженных целей $\mu_{пор}$, т. е. количеством пораженных целей в единицу времени (рис. 3)

$$C_{пу} = C_{пу1} \mu_{пор}, \quad (5)$$

где $C_{пу1}$ — средняя величина ущерба, наносимого одним БПЛА.

Процесс противодействия БПЛА может быть представлен в виде N -ка-

нальной системы массового обслуживания (СМО). Количество каналов соответствует количеству средств противодействия БПЛА, а все обнаруживаемые средствами радиолокации цели помещаются в M -местную очередь (рис. 4). Размер очереди определяется возможностями средств радиолокации по количеству сопровождаемых целей. Поток целей поступает с некоторой интенсивностью μ . Каждый из каналов способен обеспечить воздействие по цели для её поражения с некоторой интенсивностью λ .

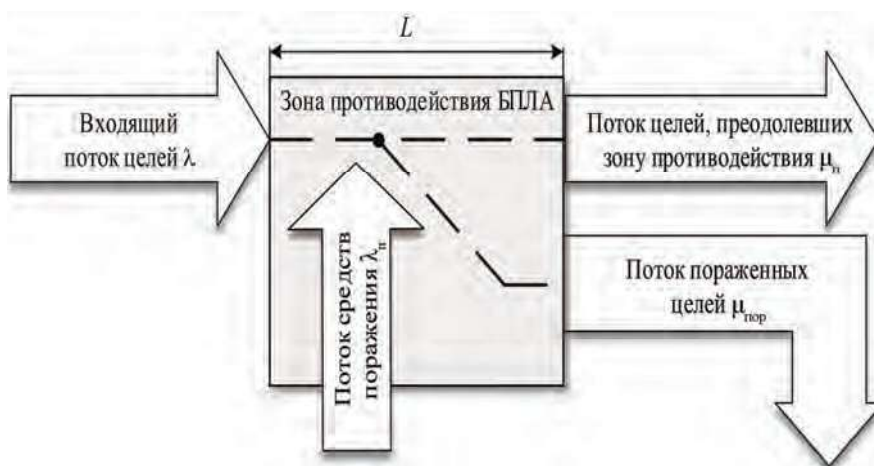


Рис. 3. Схема потоков в процессе противодействия БПЛА

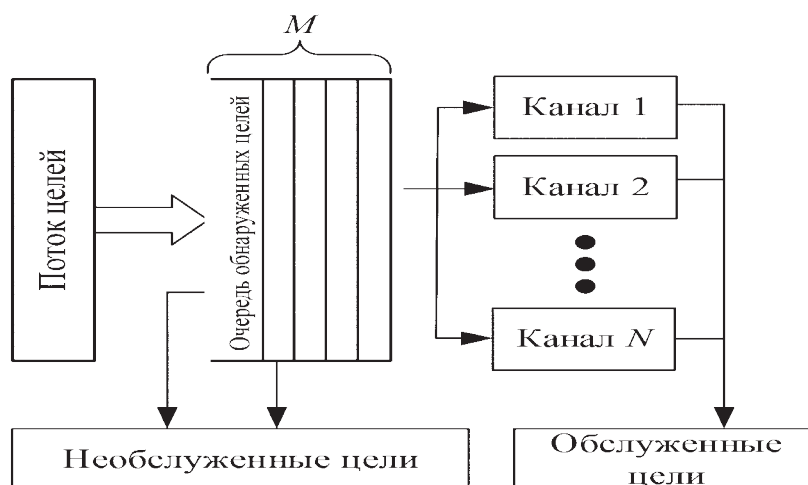


Рис. 4. Схема N -канальной СМО с M -местной очередью и «нетерпеливыми» заявками

Учитывая, что время пребывания БПЛА в зоне противодействия является ограниченным (определяется средней скоростью цели $V_{ц}$ и протяженностью зоны противодействия L), то процесс поражения целей и преодоления зоны противодействия описывается как многоканальная СМО с ограниченным временем ожидания в очереди⁶. Процесс обслуживания целей в такой СМО характеризуется «нетерпеливостью», т. е. ситуацией, когда заявки покидают систему при превышении некоторого среднего времени ожидания в очереди $t_{ок} = L / V_{ц}$. Также цель может быть не обслужена, если для нее не хватило места в очереди.

Оценка вероятности потери заявки (преодоления зоны противодействия) может быть определена в соответствии с выражениями⁷

$$P_{пз} = P_{N+M} + P_{унз} - P_{N+M}P_{унз}, \quad (6)$$

$$P_{N+M} = \frac{a^{N+M}}{n!} \prod_{k=1}^M \frac{1}{n+k\Theta}, \quad (7)$$

$$P_{унз} = m_{оч}\Theta/a, \quad (8)$$

где: P_{N+M} — вероятность отказа в приеме заявки из-за занятости всех M мест в очереди;

$P_{унз}$ — вероятность ухода заявки из очереди из-за «нетерпеливости»;

$a = \mu / \lambda$ — приведенная нагрузка;

$\Theta = (t_{ок}\mu)^{-1}$ — приведенная «нетерпеливость» (при $\Theta \rightarrow 0$ «нетерпеливость» отсутствует, при $\Theta \rightarrow \infty$ «нетерпеливость» максимальная);

$$m_{оч} = \sum_{j=1}^N jP_{N+j}.$$

Тогда интенсивности потока пораженных целей $\mu_{пор}$ и целей $\mu_{ц}$, преодолевших зону противодействия, определяются как⁸

$$\mu_{пор} = \mu(1 - P_{пз})P_{пор}, \quad (9)$$

$$\mu_{ц} = \mu - \mu_{пор}, \quad (10)$$

где $P_{пор}$ — вероятность поражения или блокирования цели средством противодействия.

На рисунке 5 представлены зависимости вероятности преодоления зоны противодействия от количества мест в очереди при различных значениях Θ , характеризующих время нахождения цели в зоне противодействия. Зависимости получены при значениях $n = 4$ и $a = 2$. Характер зависимостей показывает, что увеличение времени нахождения цели в зоне противодействия (что эквивалентно пропорциональному уменьшению значения Θ) обеспечивает уменьшение вероятности преодоления зоны противодействия. При этом нехватка мест в очереди существенно снижает эффективность противодействия. Наблюдается ситуация, когда при малом количестве мест в очереди (малых значениях M) даже небольшое добавление мест в очереди приводит к снижению вероятности преодоления зоны противодействия $P_{пз}$. То есть своевременное обнаружение воздушных целей и увеличение каналов их обнаружения и сопровождения обеспечивает существенное снижение вероятности $P_{пз}$, даже когда поток целей превышает возможности средств противодействия по их обслуживанию.

Для оценки эффективности средств противодействия БПЛА с использованием малогабаритных средств радиолокации можно использовать критерий, характеризующий разницу между стоимостью предотвращения ущерба от налета БПЛА $C_{пу}$ и затратами на противодействие им $C_{пд}$: $\Theta_{пд} = C_{пу} - C_{пд}$.

К ВОПРОСУ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОТИВОДЕЙСТВИЯ МАЛОРАЗМЕРНЫМ БЕСПИЛОТНЫМ ЛЕТАТЕЛЬНЫМ АППАРАТАМ

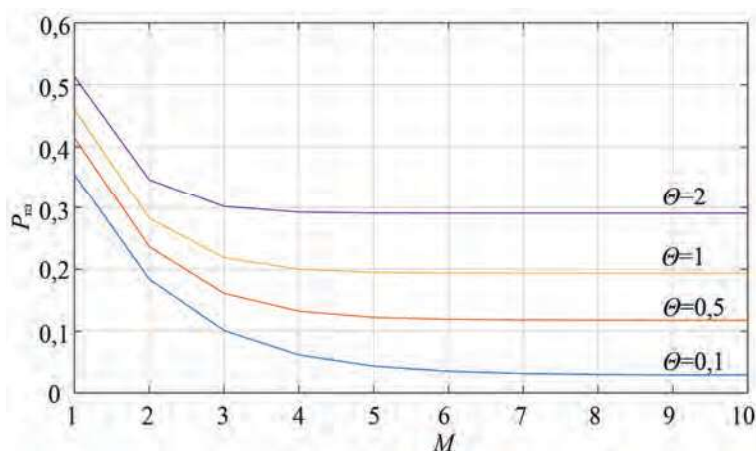


Рис. 5. Зависимости вероятности преодоления зоны противодействия от количества мест в очереди

Затраты на противодействие БПЛА в заданной зоне могут быть определены на основе расчета стоимости затрат на восполнение расходуемых средств поражения $\lambda_n N C_{сп1}$ и стоимости эксплуатации средств, находящихся в зоне противодействия

$$C_{пд} = \lambda_n N C_{сп1} + \sum_{i=1}^n C_{спi}, \quad (11)$$

где: $C_{сп1}$ — затраты на восполнение расходуемых средств поражения одного средства противодействия;

λ_n — интенсивность поражения БПЛА;

N — количество каналов средств противодействия;

$C_{спi}$ — средняя стоимость эксплуатации i -го средства противодействия БПЛА.

Очевидно, что повышение эффективности борьбы с БПЛА связано с поиском таких значений N , M и L , обеспечивающих максимизацию эффективности противодействия при заданном значении вероятности преодоления зоны противодействия $P_{из}$. Такая задача может быть решена, например, с использованием теории математического программирования

или путем численного моделирования с учетом взаимного расположения средств радиолокации и противодействия.

Таким образом, повышение эффективности противодействия малоразмерным БПЛА может быть обеспечено за счет применения малогабаритных средств радиолокации, размещаемых на БПЛА самолетного и мультикоптерного типа и осуществляющих дежурство в заданных зонах или на угрожающих направлениях. Для обеспечения высоких энергетических характеристик при небольших массогабаритных

Процесс противодействия БПЛА может быть представлен в виде N-канальной системы массового обслуживания. Количество каналов соответствует количеству средств противодействия БПЛА, а все обнаруживаемые средствами радиолокации цели помещаются в M-местную очередь.

характеристиках РЛС целесообразно ее построение как РЛС с непрерывным линейным частотно-модулированным (ЛЧМ) излучением⁹. Такая структура РЛС, кроме того, позволяет: *во-первых*, использовать широкополосные сигналы (десятки–сотни мегагерц и более), *во-вторых*, упростить конструкцию РЛС и объем обрабатываемых данных за счет простой реализации демодуляции принятого широкополосного сигнала путем перемножения с его копией,

в-третьих, исключить слепую зону на малых дальностях.

Представленная аналитическая модель *N*-канальной *M*-местной СМО с «нетерпеливыми» заявками может быть использована для анализа и синтеза рационального состава средств противодействия БПЛА и средств радиолокации, обеспечивающих максимальную эффективность их применения по критерию максимизации предотвращенного ущерба при минимально возможных затратах.

ПРИМЕЧАНИЯ

¹ Тикшаев В.Н., Барвиненко В.В. Проблема борьбы с беспилотными летательными аппаратами и возможные пути ее решения // Военная Мысль. 2021. № 1. С. 125—132.

² Ермолин О.В., Зубов Н.П. Применение комплексов вооружения с авиационными барражирующими боеприпасами в современных и будущих военных конфликтах // Военная Мысль. 2021. № 3. С. 58—63.

³ Ростопчин В.В. Ударные беспилотные летательные аппараты и противовоздушная оборона — проблемы и перспективы противостояния // Беспилотная авиация. 2019. URL: [https://www.researchgate.net/publication/331772628_Udarnye_bespilotnye_letatelnye_apparaty_i_protivovozdusnaya_oborona_-_problemy_i_perspektivy_protivostoania](https://www.researchgate.net/publication/331772628_Udarnye_bespilotnye_letatelnye_apparaty_i_protivovozdusnaya_oborona_-_problemy_i_perspektivy_protivostoaniya) (дата обращения: 03.01.2022).

⁴ Макаренко С., Афонин И. Опыт боевого применения групп беспилотных летательных аппаратов в военных конфликтах в Сирии, Ливии и Нагорном Карабахе // Радиоэлектронные технологии. 2021. № 3. С. 62—68.

⁵ По мнению редакции журнала «Военная Мысль», данный подход к оценке эффективности применения средств ПВО по критерию эффективность—стоимость не вполне корректен, так как не учитывает важность (стоимость) объекта, прикрываемого от ударов с воздуха (например, КП высшего звена военного

управления, атомной электростанции или другого экологически опасного объекта). Здесь уместно вспомнить исторически известный пример с прикрытием зенитными средствами в годы Второй мировой войны «северных» морских конвоев союзников, когда пытались сравнить стоимость зенитных средств, установленных на судах, с относительно небольшой стоимостью самолетов Германии, сбитых при атаке конвоев. Жизнь заставила сравнивать стоимость зенитных средств со стоимостью предотвращенного ущерба — стоимостью не потопленного противником вооружения, техники и материальных средств.

⁶ Новиков О.А., Петухов С.И. Прикладные вопросы теории массового обслуживания. М.: Советское радио, 1969. 400 с.

⁷ Мальшиев Д.А., Таранцев А.А., Холостов А.Л. Моделирование работы дежурно-диспетчерских служб с учетом ограничения времени ожидания абонентов // Пожары и чрезвычайные ситуации: предотвращение, ликвидация. 2017. № 4. С. 23—27.

⁸ Боевые авиационные комплексы и их эффективность / под ред. О.В. Болховитинова. М.: ВВИА им. проф. Н.Е. Жуковского, 2008. 224 с.

⁹ Купряшкин И.Ф., Лихачев В.П., Рязанцев Л.Б. Малогабаритные радиолокационные станции с непрерывным частотно-модулированным излучением: монография. М.: Радиотехника, 2020. 276 с.