

УДК 623.094

**А.С. ГУСЕВА**

**Р.А. ДУРНЕВ**, доктор технических наук, доцент

## **ОЦЕНКА ЖИВУЧЕСТИ И ЭФФЕКТИВНОСТИ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ: НЕКОТОРЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ МЕТОДИЧЕСКОГО ПОДХОДА**

*Выполнена априорная оценка живучести и эффективности мини-БПЛА с помощью нового методического подхода. Показана принципиальная возможность его использования для обоснования системы эшелонированной обороны от массированного нападения мини-БПЛА.*

*Ключевые слова: беспилотный летательный аппарат; этапы применения; поражающие факторы; живучесть элементов; эшелонированная оборона.*

В работе [1] представлен методический подход к предварительной технико-экономической оценке традиционных и нетрадиционных систем противодействия массированному налету мини-БПЛА. Он позволяет учитывать живучесть к воздействию поражающих факторов (ПФ) на отдельные элементы, подсистемы и образцы мини-БПЛА, а также способы и условия их применения.

В настоящей статье с применением указанного методического подхода, в основу которого положен адаптированный к решаемой задаче логико-вероятностный метод (ЛВМ) [2], проведена условная оценка живучести и эффективности мини-БПЛА. Ее условность определяется произвольным выбором элементов рассматриваемого летательного аппарата типа «квадрокоптер», не отражающим их конкретный состав в реальных образцах, и, соответственно, гипотетичностью рассматриваемой структурно-логической схемы (СЛС), выбором абстрактных элементов полета и этапов применения мини-БПЛА, а также неопределенностью данных по изменению живучести элементов при воздействии на них различных ПФ. В целом необходимо отметить, что все оценки осуществляются только в методических целях, для принципиальной оценки возможностей данного подхода.

Основная СЛС, учитывающая живучесть элементов мини-БПЛА, их структуру (взаимное расположение с учетом материальных, информационных и энергетических связей), а также тактические особенности использования указанного летательного аппарата, показана на рисунке 1. Построение этой и последующих СЛС, а также все расчеты осуществлялись с использованием программного комплекса (ПК) «Арбитр» на основе схем, приведенных в [1].

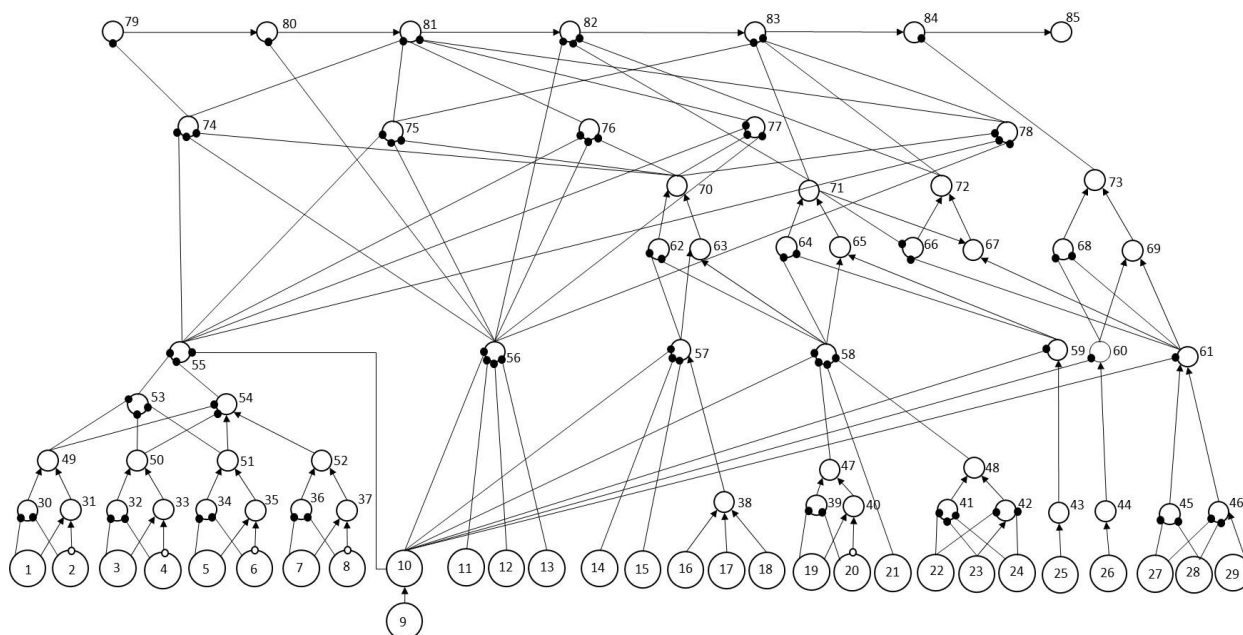


Рисунок 1 – СЛС выполнения задачи по поражению объекта с использованием мини-БПЛА

На вышеприведенном рисунке функциональными вершинами обозначены следующие элементы блоков мини-БПЛА [3-5]:

двигательный блок: 1, 3, 5, 7 – двигатели; 2, 4, 6, 8 – электронные контроллеры скорости (ЭКС) вращения;

энергетический блок: 9 – аккумуляторная батарея; 10 – плата распределения питания (ПРП);

блок бортовой цифровой вычислительной машины (БЦВМ): 11 – синхронизатор; 12 – блок цифровой обработки; 13 – устройство ввода-вывода;

блок телеметрии и связи: 14 – бортовой модуль телеметрии; 15 – бортовая антенна; 16 – модуль мобильной связи; 17 – модуль связи на базе Wi-Fi (Wi-Max, LTE); 18 – модуль спутниковой связи;

блок инерциальной навигационной системы: 19 – гироскоп; 20 – магнитометр; 21 – датчик абсолютного давления; 22 – датчик угловой скорости; 23 – акселерометр; 24 – датчик разности давлений;

блок спутниковой навигации: 25 – антенна спутниковой навигации; 43 – модуль спутниковой навигации;

блок целевой нагрузки: 26 – электронный контроллер пуска целевой нагрузки; 44 – целевая нагрузка (например, заряд ВВ);

оптико-электронный блок: 27 – тепловизор; 28 – ПЗС – матрица; 29 – лазерный указатель.

Фиктивными вершинами 30-42, 45-73 показаны «сборки отказов» вследствие потери живучести блоков двигательного, БЦВМ, телеметрии и связи, инерциальной навигационной системы, спутниковой навигации, целевой нагрузки и оптико-электронного блока.

Фиктивными вершинами 74-78 обозначены соответственно такие условные элементы полета мини-БПЛА, как «вверх», «влево-вправо», «вперед», «назад» и «вниз». Необходимость рассмотрения данных элементов полета определяется тем, что при них могут быть задействованы различные элементы (комплексы оборудования) рассматриваемого летательного аппарата. Воздействие ПФ по отдельным элементам мини-БПЛА будет приводить к их отказам и, соответственно, к потере возможности выполнять некоторые элементы полета, т.е. к потере функциональности образца. Это, в свою очередь, негативно скажется на реализации таких условных этапов применения мини-БПЛА, как «взлет» (79), «расчет маршрута» (80), «движение к цели» (81), «уточнение маршрута к цели» (82), «пикирование на цель» (83) и «огневое воздействие на цель» (84). Вершина 85 соответствует вероятности выполнения задачи.

Остальные вершины обозначают логически сложные события, связанные с дублированием некоторых функций, возможностью сохранения частичной работоспособности мини-БПЛА даже при отказе определенных элементов и т.п.

Следует отметить, что в рамках ЛВМ вначале осуществляется построение «функций работоспособности системы» (ФРС), под которой понимается «точное и однозначное представление множества состояний системы, в которых реализуется соответствующий критерий» [2] (в нашем случае – вероятность поражения (85)). Очевидно, что в данном

алгоритме должен быть предусмотрен перебор практически всех «маршрутов» СЛС, число которых растёт экспоненциально от числа вершин и связей между ними. Это подтверждается и авторами [2], которые говорят о том, что «методы определения ФРС имеют очень высокую, экспоненциальную сложность, особенно для высокоразмерных системных объектов».

Также и следующий этап ЛВМ – преобразование ФРС в вероятностную функцию, «обладает экспоненциальной сложностью, т.е. является алгоритмически неэффективным» [2]. Все это позволяет предположить, что это NP-задача, время решения которой в геометрической прогрессии (экспоненциально) растёт с увеличением объема данных. В этой связи при превышении времени авторского терпения в получении результатов расчетов по схеме на рисунке 1 были предприняты попытки упростить, в том числе декомпозировать, данную задачу.

Для этого вначале производился расчет вероятности безотказной работы мини-БПЛА в зависимости от живучести его элементов, т.е. без учета тактических особенностей его применения. Абсолютное значение указанной вероятности зависит, в основном, от конкретных значений живучести (вероятностей безотказной работы) элементов. Тривиально увеличивая данные значения можно добиться повышения живучести мини-БПЛА в целом. В этой связи большой интерес представляла оценка вкладов различных элементов в обеспечение живучести рассматриваемого образца с учетом их дублирования и резервирования, конкретной структуры связей и т.п. Под вкладом понимается значение абсолютного изменения системного показателя (вероятности безотказной работы мини-БПЛА) при изменении значения показателя элемента (живучести) от нуля до единицы.

Расчеты, приведенные в отчете о НИР<sup>1</sup>, показывают, что в наибольшей степени живучесть мини-БПЛА зависит от живучести ПРП, а также составных частей БЦВМ, в несколько меньшей (примерно на 10%) – от живучести каждого из двигателей (в связи с принятым допу-

---

<sup>1</sup>Отчет о НИР «Методический аппарат оценки уязвимости образцов мини-БПЛА к воздействию поражающих факторов современного оружия». М.: ФГБУ «РАРАН», 2020. 78 с. Отчёт занял 1 место на конкурсе научно-исследовательских теоретических и экспериментальных работ, связанных с обоснованием развития и создания вооружения, военной и специальной техники, молодых ученых организаций-ассоциированных членов РАРАН.

щением о том, что возможность передвижения квадрокоптера сохранится при выходе из строя одного двигателя) и аккумулятора. Вклад элементов блока инерциальной навигационной системы примерно на 50% ниже уровня ПРП (за исключением магнитометра, вклад которого намного ниже) и т.д. Эти данные могут позволить как обосновать мероприятия по повышению живучести отдельных элементов и их блоков, так и параметры ПФ для подавления или уничтожения мини-БПЛА.

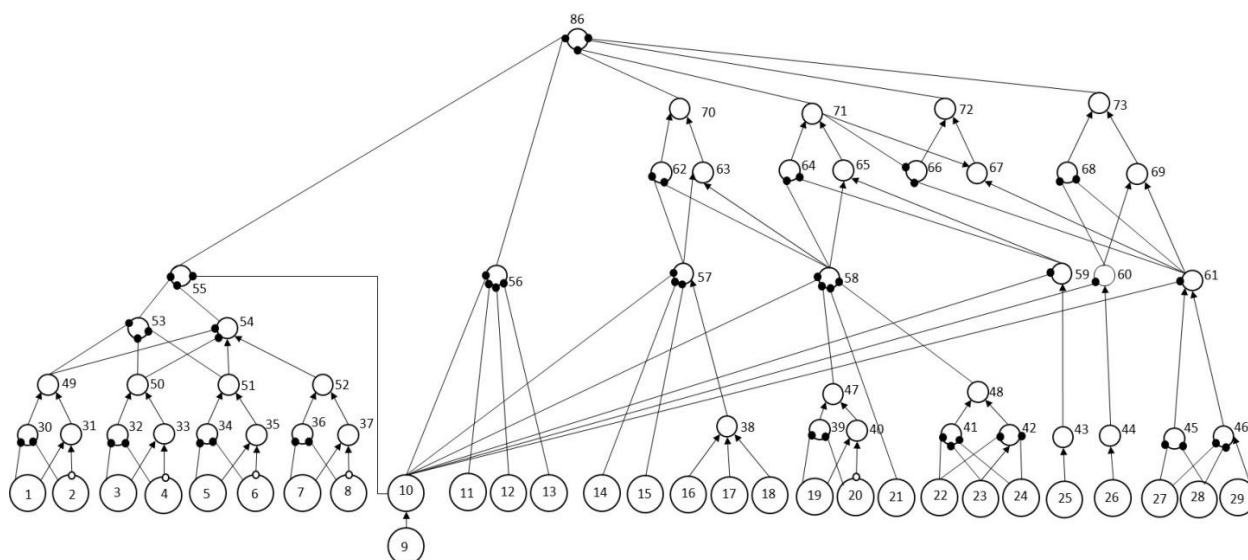


Рисунок 2 – СЛС для оценки живучести блоков элементов

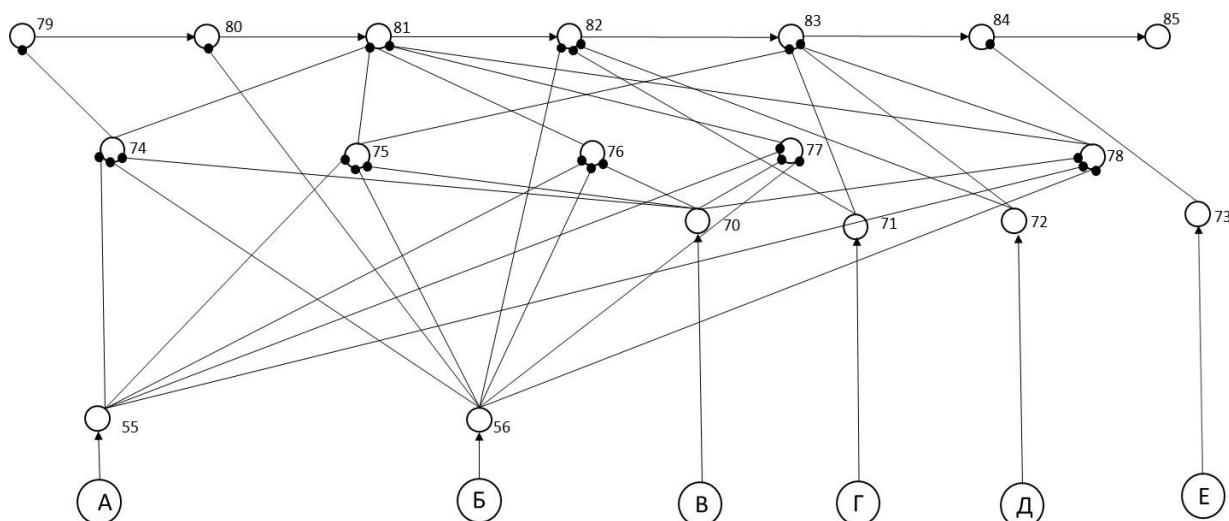


Рисунок 3 – СЛС для оценки вероятности выполнения задачи по поражению объекта с использованием мини-БПЛА

В целях одновременного учета технических и тактических особенностей применения мини-БПЛА задача была декомпозирована на две составляющие – оценка живучести блоков элементов (рисунок 2) и оценка вероятности выполнения задачи мини-БПЛА (поражение объекта) с учетом значений живучести блоков элементов (рисунок 3).

На рисунке 2 вершина 70 учитывает возможность частичного дублирования (взаимодополнения, пересечения) функций блоков телеметрии и связи и инерциальной навигационной системы, 71 – блоков инерциальной навигационной системы, спутниковой навигации и оптико-электронного блока, 72 – инерциальной навигационной системы и оптико-электронного блока, 73 – оптико-электронного блока и блока целевой нагрузки. 86 – это функциональная вершина оценки живучести блоков элементов мини-БПЛА.

На рисунке 3 на нижнем уровне показаны функциональные вершины А-Е, содержащие обобщенные значения живучести блоков элементов.

Расчеты в отчете о НИР<sup>2</sup> показывают, что влияние блоков элементов на вероятность поражения объекта с использованием мини-БПЛА можно ранжировать (от большего к меньшему) следующим образом:

- 1 – двигательный блок и БЦВМ;
- 2 – совместно блоки телеметрии и связи и инерциальной навигационной системы;
- 3 – совместно блоки инерциальной навигационной системы, спутниковой навигации и оптико-электронный блок;
- 4, 5 – совместно блок инерциальной навигационной системы и оптико-электронный блок;
- 4, 5 – совместно оптико-электронный блок и блок целевой нагрузки.

Интересным представляется тот факт, что вклад оптико-электронного блока меняется в зависимости от комбинаций используемого оборудования для выполнения различных элементов полета и этапов применения мини-БПЛА.

Указанная процедура декомпозиции имеет определенную методическую ценность, наверное тем большую, чем больше вершин и ребер рассматривается. Но, к сожалению, при её применении теряется часть

---

<sup>2</sup>Отчет о НИР «Методический аппарат оценки уязвимости образцов мини-БПЛА ...».

информации о влиянии живучести элементов на вероятность поражения с использованием мини-БПЛА, т.к. для основной СЛС (рисунок 1) перебираются не все возможные комбинации вариантов. В этой связи в целях получения дополнительной информации оценивалось влияние живучести элементов на каждый из этапов применения мини-БПЛА. Это является вполне корректным, т.к. этапы выполняются последовательно и каждый из них безусловно важен для выполнения задачи в целом (за некоторым исключением последнего этапа, реализация которого во многих условиях боевой задачи может быть детерминирована, например, путем дистанционного, контактного и других видов подрыва ВВ).

Оценка вкладов живучести отдельных элементов мини-БПЛА в вероятность реализации этапа «взлет» показывает, что в наибольшей степени данный этап зависит от живучести ПРП, а также составных частей БЦВМ. В несколько меньшей (примерно на 10%) указанная вероятность зависит от живучести каждого из двигателей и аккумулятора. Вклад элементов блока бортовой телеметрии и связи, а также совместный вклад этого блока и инерциальной навигационной системы примерно на 50% ниже уровня ПРП.

Вклады живучести отдельных элементов мини-БПЛА в вероятность реализации этапа «расчет маршрута» значительны только для ПРП и составных частей БЦВМ.

Для этапа «движение к цели», как показывают расчеты<sup>3</sup>, наибольшее влияние оказывают ПРП, составные части БЦВМ, блок бортовой телеметрии и связи. Несколько меньшее влияние (примерно на 10%) у каждого из двигателей и аккумулятора. На 45-50% ниже значения совместного вклада блока бортовой телеметрии и связи и инерциальной навигационной системы (от уровня ПРП). Еще меньше вклад у остальных элементов мини-БПЛА.

Вероятность реализации этапа «уточнение маршрута» в большей степени зависит от совместной живучести инерциальной навигационной системы и блока спутниковой навигации. На 25-30% меньше вклад ПРП, БЦВМ и оптико-электронного блока.

Вклады живучести отдельных элементов мини-БПЛА в вероятность реализации этапа «пикирование на цель» наиболее значительны для

---

<sup>3</sup>Отчет о НИР «Методический аппарат оценки уязвимости образцов мини-БПЛА ...».

элементов блока бортовой телеметрии и связи, инерциальной навигационной системы и оптико-электронного блока. На 10-15% меньше вклад у ПРП, двигателей и БЦВМ, на 50-55% – у блока спутниковой навигации.

Для этапа «огневое воздействие», как показывают расчеты, значимы, в основном, блок целевой нагрузки, оптико-электронный блок и ПРП.

С учетом вышеприведенных результатов возможно оценить обобщенную значимость элементов мини-БПЛА с точки зрения влияния на вероятности реализации этапов применения данного летательного аппарата. В связи с условностью и приближенностью расчетов такая оценка проводилась по порядковой (ранговой) шкале (таблица 1).

Таблица 1 – Оценка обобщенной значимости элементов мини-БПЛА

Блоки элементов (элементы)	Ранги блоков элементов для этапов применения						Сумма рангов	Обобщенная значимость
	взлет	расчет маршрута	движение к цели	уточнение маршрута	пикирование на цель	огневое воздействие		
ПРП	1	1	1	2	2	1	8	<b>1</b>
двигательный блок	2	2	2	3	2	2	13	<b>4</b>
БЦВМ	1	1	1	2	2	2	9	<b>2</b>
блок телеметрии и связи	3	2	2	3	1	2	14	<b>5</b>
блок инерциальной навигационной системы	3	2	3	1	1	2	12	<b>3</b>
блок спутниковой навигации	4	2	4	1	3	2	16	<b>6</b>
блок целевой нагрузки	4	2	4	3	4	1	18	<b>7</b>
оптико-электронный блок	4	2	4	2	1	1	14	<b>5</b>

С учетом данных таблицы 1 возможно сделать следующие предварительные выводы.

1. Для мини-БПЛА условного противника вне зависимости от этапов его применения целесообразно воздействие ПФ, прежде всего, на ПРП, элементы БЦВМ, блок инерциально-навигационной системы и двигательный блок (совместно с ЭКС). При этом очевидно, что воздействие по данным элементам целесообразно совершать на ранних этапах применения, т.к. их отказ является катастрофичным и для реализации более поздних этапов применения.



2. При разработке отечественных мини-БПЛА целесообразно предусмотреть меры по увеличению живучести элементов данных блоков.

3. В зависимости от этапов применения мини-БПЛА рационально использование следующих типов вооружения:

для этапов «взлет» и «расчет маршрута» – зенитные ракетно-пушечные комплексы (ЗРПК) (для механического поражения энергетического и двигательного блока или мини-БПЛА в целом), оружие направленной энергии (ОНЭ), кроме лазерного (для подавления БЦВМ и ПРП);

для этапа «движение к цели» – ЗРПК (для механического поражения энергетического и двигательного блока), ОНЭ, кроме лазерного (для воздействия на ПРП, ЭКС двигателей, объекты микроэлектроники в составе БЦВМ), а также средства РЭБ (для подавления блока телеметрии и связи);

для этапа «уточнение маршрута» – средства РЭБ (для подавления блока спутниковой навигации), ОНЭ, кроме лазерного, (для подавления инерциально-навигационной системы, ПРП, БЦВМ и оптико-электронного блока);

для этапа «пикирование на цель» – средства РЭБ (для подавления блока телеметрии и связи), ОНЭ, включая лазерное (для подавления инерциально-навигационной системы, ПРП, БЦВМ и оптико-электронного блока).

Для скоротечного этапа «огневое воздействие» можно условно предложить применение лазерного оружия для подавления оптико-электронного блока и поражения блока целевой нагрузки.

4. Предыдущий вывод можно использовать для обоснования параметров эшелонирования обороны от массированного применения мини-БПЛА:

в первом эшелоне – ЗРПК, ОНЭ;

во втором эшелоне – ЗРПК, средства РЭБ, ОНЭ (кроме лазерного);

в третьем эшелоне – РЭБ, ОНЭ, включая лазерное оружие.

При наличии исходных данных по характеристикам мини-БПЛА, параметрам массированного удара, координатным и параметрическим законам воздействия ПФ указанных видов оружия, а также особенностям обороняемого объекта возможно обоснование практически всех параметров системы эшелонированной обороны от массированного налета рассматриваемых средств воздушного нападения.

5. Исходя из полученных результатов возможно предположить, что целесообразно:

увеличение чувствительности средств радиолокации, радио- и радиотехнического, оптико-электронного и акустического наблюдения (для целеуказания ЗРПК);

обеспечение многоспектральности аппаратуры обнаружения и целеуказания для ЗРПК;

увеличение дальности действия ОНЭ и т.п.

Таким образом, методический подход к предварительной технико-экономической оценке традиционных и нетрадиционных систем противодействия массированному налету мини-БПЛА позволяет определить элементы мини-БПЛА, которые в первую очередь целесообразно поражать или подавлять, рациональные типы вооружения для использования против указанных летательных аппаратов на различных этапах их применения, параметров эшелонирования обороны от массированного применения мини-БПЛА, а также направления развития современных видов вооружения в интересах борьбы с ними.

#### Список использованных источников

1. Гусева А.С., Дурнев Р.А., Свиридок Е.В. Методический подход к оценке эффективности поражения воздушных РТК // Сборник IV Всероссийской научно-практической конференции молодых ученых и специалистов организаций – ассоциированных членов РАН «Молодежь. Наука. Инновации в оборонно-промышленном комплексе». Реутов: ФГБУ РАН, АО «ВПК «НПО машиностроения», 2020.

2. Поленин В.И., Рябинин И.А., Свирин С.К., Гладкова И.А. Применение общего логико-вероятностного метода для анализа технических, военных организационно-функциональных систем и вооруженного противоборства / Под ред. А.С. Можяева. СПб.: СПб-региональное отделение РАЕН, 2011. 416 с.

3. Макаренко С.И., Тимошенко А.В., Васильченко А.С. Анализ средств и способов противодействия беспилотным летательным аппаратам. Часть 1. Беспилотный летательный аппарат как объект обнаружения и поражения // Системы управления, связи и безопасности. 2020. №1.

4. Интеллектуальные информационные управляющие системы со сложными локационными сигналами для беспилотных летательных аппаратов / Подоплёкин Ю.Ф. [и др.]. СПб.: БГТУ; АО «Концерн «Гранит-Электрон»; РАН, 2020. 244 с.

5. Биард Р.У., МакЛэйн Т.У. Малые беспилотные летательные аппараты: теория и практика. М.: Техносфера, 2015. 312 с.