

УДК 623.618

## Формирование маршрутов полета беспилотных летательных аппаратов с учетом местоположения средств противовоздушной обороны и радиоэлектронного подавления

Васильченко А. С., Иванов М. С., Колмыков Г. Н.

**Актуальность.** Боевое применение беспилотных летательных аппаратов (БЛА) специального назначения, как правило, происходит на театрах военных действий (ТВД), оборудованных средствами противовоздушной обороны (ПВО) и радиоэлектронного подавления (РЭП) противника. **Целью данной работы** является повышение живучести БЛА и устойчивости управления им на ТВД оборудованных средствами ПВО и РЭП противника. **Результаты.** В статье предложена методика для формирования маршрутов полета БЛА в обход зон ПВО и РЭП. Маршруты полетов формируются на основе модифицированного алгоритма Дейкстры, который позволяет формировать основные и дополнительные маршруты полетов БЛА на ТВД. В дальнейшем зоны ПВО и РЭП учитываются при автоматизированном маршрутном управлении БЛА путем формирования маршрута полета БЛА в обход средств ПВО и РЭП. **Новизна.** Новизной данного решения, отличающей его от известных работ в области формирования маршрутов полетов БЛА, является учет в качестве факторов, препятствующих полету БЛА, местоположения средств ПВО и РЭП, а также зон их поражения. Эти факторы формализуются в виде интегральной метрики узлов графа геотопологической модели зоны полетов на ТВД. **Практическая значимость.** Данное решение позволяет повысить устойчивость управления БЛА при их боевом применении на ТВД, оборудованных средствами ПВО и РЭП.

**Ключевые слова:** маршрут полета, беспилотный летательный аппарат, устойчивость управления, геотопологическая модель, театр военных действий, противовоздушная оборона, радиоэлектронное подавление, радиоэлектронная борьба.

### Введение

Из анализа применения беспилотных летательных аппаратов (БЛА) в последних локальных военных конфликтах [1, 2], а также опыта применения БЛА в операции Воздушно-космических сил (ВКС) РФ в Сирии [3] следует, что БЛА преимущественно применяются в тех районах театра военных действий (ТВД), где применение пилотируемой авиации неоправданно или нецелесообразно, в виду высокой вероятности поражения пилотируемых летательных аппаратов (ЛА). Основными угрозами для БЛА на современном ТВД является возможность поражения их средствами зенитно-ракетных комплексов (ЗРК) противовоздушной обороны (ПВО), а также нарушение функционирования средствами радиоэлектронного подавления (РЭП) командной радиопередачи управления (КРУ) между пунктом управления (ПУ) и БЛА. При этом перспективным

#### Библиографическая ссылка на статью:

Васильченко А. С., Иванов М. С., Колмыков Г. Н. Формирование маршрутов полета беспилотных летательных аппаратов с учетом местоположения средств противовоздушной обороны и радиоэлектронного подавления // Системы управления, связи и безопасности. 2019. № 4. С. 403-420. DOI: 10.24411/2410-9916-2019-10416.

#### Reference for citation:

Vasilchenko A. S., Ivanov M. S., Kolmykov G. N. Unmanned aerial vehicles flight routes formation, taking into account the location of air defense and electronic warfare means. *Systems of Control, Communication and Security*, 2019, no. 4, pp. 403-420. DOI: 10.24411/2410-9916-2019-10416 (in Russian).

направлением повышения живучести БЛА, в условиях применения по ним ЗРК ПВО, а также помехоустойчивости КРУ БЛА, в условиях применения средств РЭП, является рассмотрение возможностей пространственного маневра маршрутом БЛА с целью обхода областей тактического преимущества противника – зон ПВО и РЭП.

Целью данной работы является разработка теоретических решений, направленных на формирование множества маршрутов полета БЛА на ТВД в обход местоположения средств ПВО и РЭП, с учетом зон их поражения.

### **Анализ известных работ в исследуемой области**

Задача формирования маршрутов полета ЛА и БЛА достаточно подробно рассмотрена в известной литературе. Классическими работами в области управления ЛА являются работы В.Н. Абрамова [4] и О.В. Болховитинова [5].

Особенности реального управления и применения БЛА, в том числе и в условиях боевых действий, а также противодействия ПВО и РЭП подробно рассмотрены в работах: С.И. Макаренко [1, 2], Г.А. Мазулина [3], М.К. Казамбаева, Б.Ж. Куатова [6], Б.И. Казарьяна [7], В.В. Ростопчина [8]. Опыт реального боевого применения БЛА, показывает, что для обеспечения устойчивости управления БЛА первостепенное значение имеет обеспечение непрерывной устойчивой связи с ними, а также формирование маршрутов полета в обход местоположения средств ПВО и РЭП.

Маршрутное управление БЛА с обходом опасных зон и препятствий рассмотрено в работах И.А. Батраевой Д.П. Тетерина [9], Н.П. Зубова [10], А.Н. Козуба, Д.П. Кучерова [11], Г.Н. Лебедева, А.В. Румакина [12], А.Н. Попова, Д.П. Тетерина [13], К.С. Яковлева, Е.С. Баскина, А.А. Андрейчука [14].

Однако, если в работах по управлению пилотируемых ЛА [4, 5], вопросы формирования маршрутов и профилей полета с обходом зон тактического преимущества противника, рассмотрены достаточно подробно, то в работах посвященных управлению БЛА [9-14] эти вопросы широко не исследованы, при том, что именно для БЛА эти вопросы гораздо более актуальны, чем для пилотируемых ЛА, в связи с тем, что система управления его полетом удалена от него на десятки километров, а сам БЛА в условиях подавления КРУ имеет низкий уровень автономности принятия решения о направлении дальнейшего полета.

Анализ методов теории графов [15] показал, что для решения задачи поиска путей в графах применяются математические алгоритмы поиска кратчайших путей. При этом наиболее широко используемым таким алгоритмом является алгоритм Дейкстры [16]. Однако особенностью этого алгоритма является то, что он является «поглощающим» и формирует из каждого узла графа к другому узлу только один маршрут, являющейся кратчайшим по сумме метрики в сети. Однако в практике боевого применения БЛА необходимо иметь возможность скорректировать маршрут БЛА и в зависимости от текущей тактической обстановки перейти на новый маршрут, который также должен быть, во-первых, «квази-кратчайшим», во-вторых, пролегать в обход зон тактического преимущества противника. Это требует формирования набора маршрутов, ко-

торые были бы ранжированы по степени устойчивости управления БЛА и в случае изменения условий боевого применения, система управления БЛА должна иметь возможность переключать полет БЛА с одного маршрута на другой. Решение этой задачи потребует доработки математического алгоритма Дейкстры с целью добавления в него новой функциональности – способности формировать множество маршрутов, ранжированных по суммарной метрике пути, из одного узла графа в другой. Решение подобной задачи рассматривалось в работах С.И. Макаренко [17-21] и Р.Л. Михайлова [21, 22], однако эти работы не имеют отношения к управлению БЛА и посвящены исключительно совершенствованию протоколов маршрутизации в телекоммуникационных сетях. Предлагается, приняв работы [17-22] за теоретический базис, разработать методику формирования маршрутов полета БЛА с учетом местоположения средств ПВО и РЭП, при этом в основу методики положить доработку известного алгоритма поиска кратчайших путей Дейкстры [16]. Использование вышеуказанных известных теоретических подходов, в новой области, а именно – в области формирования маршрутов полета БЛА на ТВД в условиях применения средств ПВО и РЭП, формирует основные признаки научной новизны полученных в работе результатов.

### **Формализация зоны полетов БЛА на ТВД в виде геотопологической модели**

В качестве дестабилизирующих факторов, угрожающих нарушению управления БЛА на ТВД можно рассматривать:

- 1) фактор применения противником ЗРК ПВО, ориентированный на поражение БЛА и тем самым уничтожения самого объекта управления;
- 2) фактор применения противником средств РЭП, ориентированный на подавление КРУ БЛА и тем самым нарушение гарантированного доведения до управляемого БЛА управляющих команд.

Данные факторы могут быть формализованы через соответствующие показатели – вероятность поражения БЛА средствами ПВО ( $P_{\text{пор}}$ ) и вероятности подавления КРУ БЛА средствами РЭП ( $P_{\text{под}}$ ). Предметом данной работы, не является разработка методик определения  $P_{\text{пор}}$  и  $P_{\text{под}}$ . Для определения этих вероятностей можно использовать известные работы в области оценки живучести БЛА в условиях применения против них ЗРК ПВО [8, 23], а так результаты известных работ в области оценки помехозащищенности систем радиосвязи [22, 24-27].

Для формального представления зоны выполнения боевой задачи БЛА формируется геотопологическая модель зоны полетов, покрывающая соответствующую область ТВД. Пример подобной зоны, соответствующий применению комплексов РЭП «Житель» и «Лесочек», а также ЗРК «Панцирь-С1» против разведывательных БЛА «Орлан-10» при проведении стратегических учений «Запад-2017», представлен на рис. 1. Масштаб и дискретность сетки геотопологической модели выбираются исходя из практики управления полетом БЛА и из возможностей вычислительных средств ПУ. Обычно шаг дискретизации линий сетки составляет 5 или 10 км.

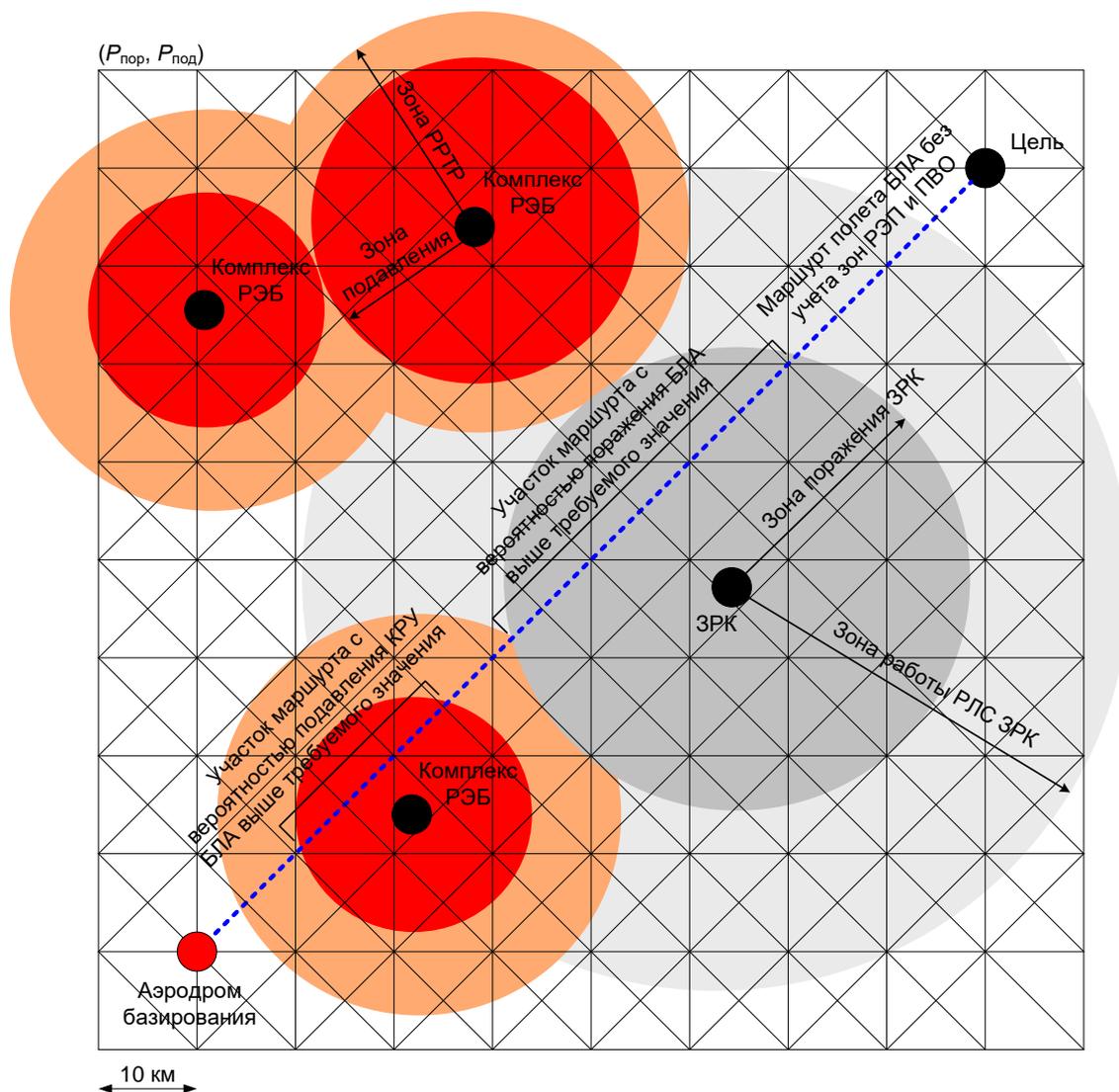


Рис. 1. Зона полетов БЛА на ТВД

Отметим, что в настоящее время средства АСУ БЛА при формировании маршрута полета не учитывают зоны ПВО и РЭП. В этом случае маршрут БЛА будет проложен по прямому пути между аэродромом базирования БЛА и целью. Однако в этом случае существует определенная возможность, что на отдельных участках маршрута БЛА может быть поражен средствами ПВО или лишиться управления вследствие подавления средствами РЭП линии КРУ. Пример такой ситуации представлен на рис. 1.

Пересечения линий сетки геотопологической модели формируют узлы графа. Каждому  $u$ -му узлу данного графа сопоставим пару значений  $(P_{пор\ u}, P_{под\ u})$ , которые определяют вероятность поражения БЛА средствами ПВО ( $P_{пор\ u}$ ) и вероятность подавления его КРУ средствами РЭП ( $P_{под\ u}$ ) при его нахождении в месте, координаты которого совпадают с месторасположением  $u$ -го узла. Пример формирования значений  $(P_{пор\ u}, P_{под\ u})$  для тактической обстановки, приведённой на рис. 1, представлен на рис. 2. Сформированная таким образом геотопологическая модель будет являться формализованной основой, на которой будут формироваться зоны ПВО и РЭП.

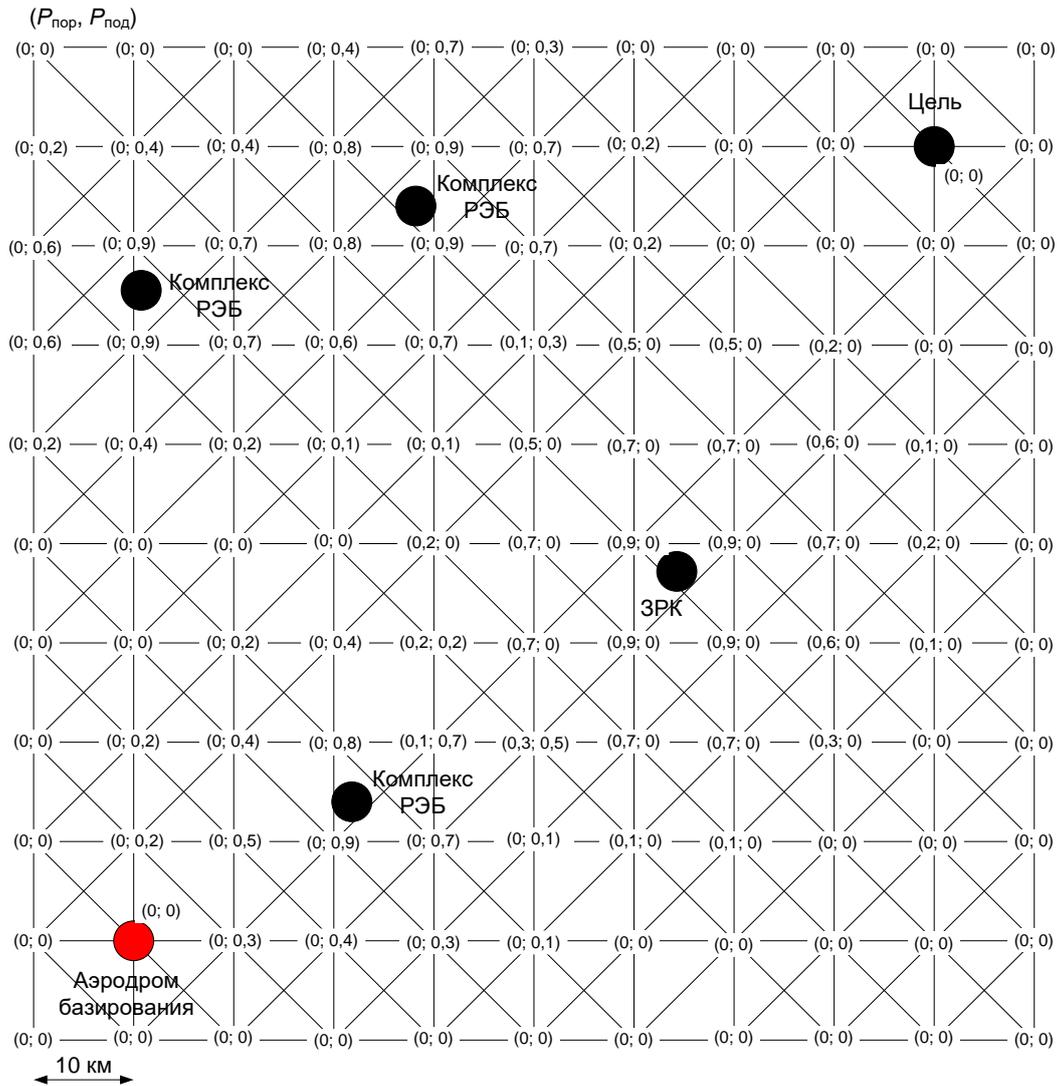


Рис. 2. Геотопологическая модель для тактической обстановки, представленной на рис. 1

Пересечения линий сетки геотопологической модели формируют узлы графа. Каждому  $u$ -му узлу этого графа сопоставим пару значений  $(P_{\text{пор } u}, P_{\text{под } u})$ , которые определяют вероятность поражения БЛА средствами ПВО ( $P_{\text{пор } u}$ ) и вероятность подавления его КРУ средствами РЭП ( $P_{\text{под } u}$ ), при его нахождении в месте, координаты которого совпадают с месторасположением  $u$ -го узла. Пример формирования значений  $(P_{\text{пор } u}, P_{\text{под } u})$  для тактической обстановки, приведённой на рис. 1, представлен на рис. 2. Сформированная таким образом геотопологическая модель, будет являться формализованной основой на которой будут формироваться зоны ПВО и РЭП.

### Формирование маршрутов полета БЛА с учетом местоположения средств ПВО и РЭП

В ходе модификации алгоритма Дейкстры в интересах его использования для разработки методики формирования маршрутов полета БЛА с учетом месторасположения средств ПВО и РЭП, в него дополнительно вносятся изменения, направленные на расширение его функциональности, связанной с возмож-

ностью формирования нескольких путей, ранжированных по степени повышения метрики. В основу предлагаемой модификации алгоритма Дейкстры приняты положения, сформулированные в работе [17].

1. При достижении очередного узла геотопологической модели, запоминаются исходящие узлы входящих в этот узел ребер, как потенциальные элементы будущих дополнительных маршрутов к этому узлу.

2. При очередном шаге функционирования методики, достигнутый очередной узел геотопологической модели проверяется как потенциальный элемент дополнительного маршрута для всех уже достигнутых узлов. Если он является потенциальным элементом дополнительного пути, формируется дополнительный путь к ранее достигнутому узлу, через только что достигнутый узел.

3. Если к ранее достигнутому узлу геотопологической модели уже были сформированы дополнительные маршруты, и он участвует в создании нового дополнительного маршрута к очередному узлу, то к очередному узлу формируется множество дополнительных маршрутов с включением в них всех возможных вариантов дополнительных маршрутов, сформированных ранее. Причем, если в дополнительный маршрут входит сам очередной узел геотопологической модели, то такой маршрут, во избежание циклов, в дополнительные не включается.

4. Все дополнительные маршруты к узлам геотопологической модели упорядочиваются в соответствии с минимизацией их весов и вносятся в таблицу маршрутов полета, одновременно с кратчайшим маршрутом. При невозможности полета БЛА по кратчайшему маршруту, система управления БЛА выбирает дополнительный путь с минимальной суммарной метрикой, не содержащий узлы, полет по которым невозможен.

Схема методики формирования маршрутов полета БЛА с учетом местоположения средств ПВО и РЭП приведена на рис. 3.

Входными параметрами методики являются:

а) усеченный граф геотопологической модели:

$$G^{***}(U, V) = G^* \setminus R_{\text{ПВО}},$$

где:  $G^*$  – множество связанных узлов графа  $G$  геотопологической модели, которые остаются доступными для формирования маршрутов полета БЛА;  $R_{\text{ПВО}}$  – множество узлов, соответствующих областям, которые подвергаются воздействию средств ПВО.

При этом решение задачи формирования множеств  $G^*$  и  $R_{\text{ПВО}}$  на ТВД на основе методов кластеризации было представлено в предыдущей работе авторов [28].

б) количество узлов в графе  $G^{***}$  –  $n$ ;

в) вес ребер, соединяющих произвольные  $i$ -ый и  $j$ -ый узлы  $V(U_i, U_j)$  графа  $G^{***}$ , при этом вес ребра считается как максимальное из значений  $P_{\text{под}}$ , соответствующих узлам начала и конца ребра:

$$V(U_i, U_j) = \max(P_{\text{под}}(U_j), P_{\text{под}}(U_i)).$$

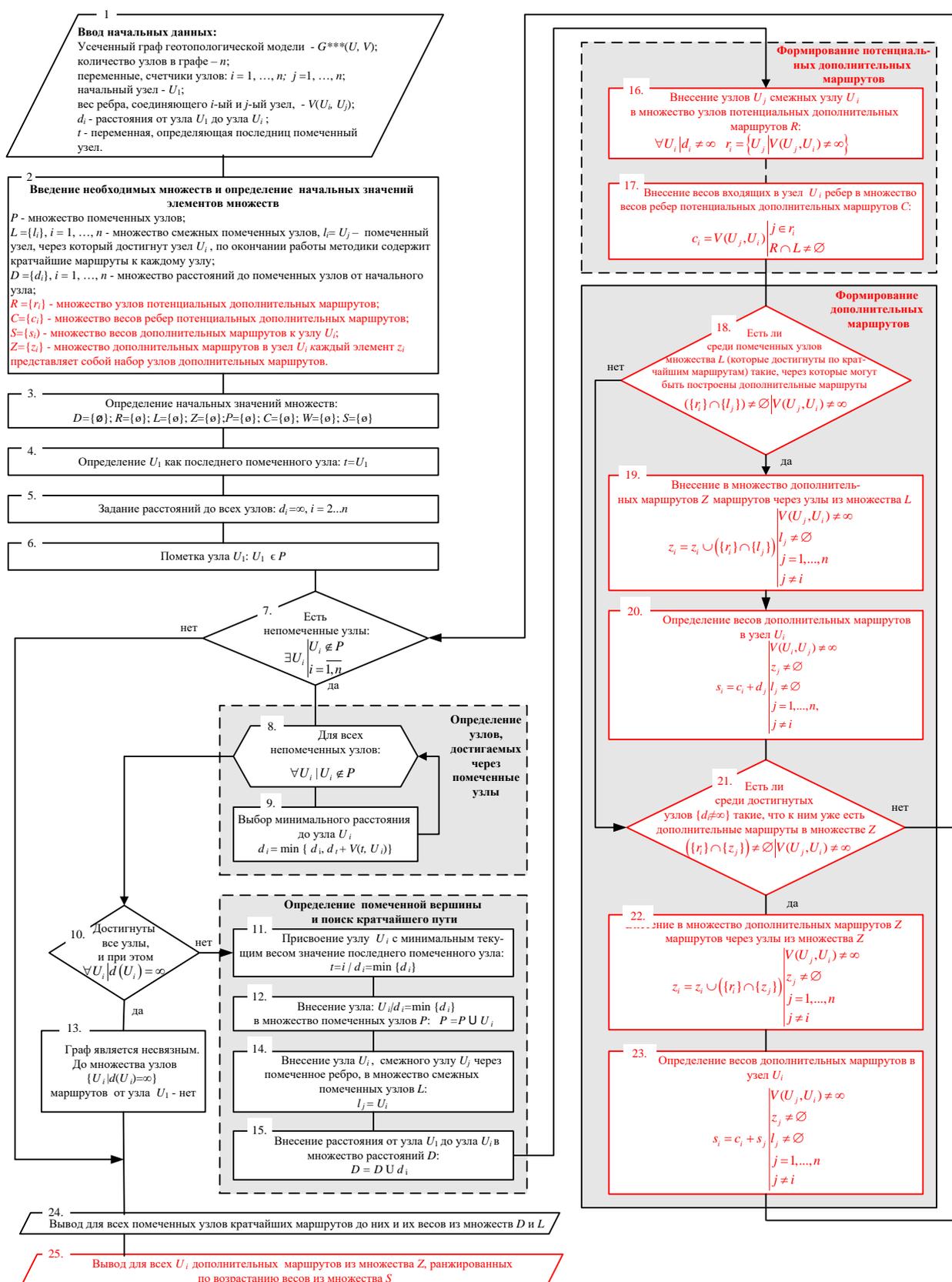


Рис. 3 – Схема методики формирования маршрутов полета БЛА с учетом местоположения средств ПВО и РЭП

Такой подход, к назначению весов ребер геотопологической модели, позволяет обеспечить выбор последующего направления движения БЛА по маршруту полета в сторону уменьшения значения  $P_{\text{под}}$ .

Для обеспечения функционирования методики помимо имеющихся множеств, предусмотренных логикой функционирования алгоритма Дейкстры ( $P$  – множество помеченных вершин,  $L$  – множество смежных помеченных вершин, множество расстояний до помеченных и вершин от начальной вершины) вводятся следующие дополнительные множества.

1.  $R$  – множество узлов потенциальных дополнительных маршрутов. В это множество вносятся достигнутые узлы, смежные рассматриваемому. В дальнейшем, элементы множества используются при нахождении дополнительных маршрутов.

2.  $C$  – множество весов ребер потенциальных дополнительных маршрутов. В это множество вносятся веса ребер, исходящих из узлов, вносимых в множество  $R$  и входящих в рассматриваемый узел.

3.  $Z$  – множество дополнительных маршрутов в узлы, содержит дополнительные маршруты в рассматриваемый узел, сформированные в результате проведения логических операций над входящими в него элементами и элементами множеств  $R$  и  $L$ .

4.  $S$  – множество весов дополнительных маршрутов к узлам. Это множество содержит веса маршрутов из множества  $Z$  и используется для ранжирования дополнительных путей при выводе результатов работы методики.

К блокам, отличающим данную методику от известного алгоритма Дейкстры, относятся блоки 16-23, 25 на рис. 3. В блоках 16-17 реализуется формирование элементов множества узлов  $R$  к текущему рассматриваемому узлу за счет использования положения № 1 по модификации алгоритма Дейкстры. Далее, в блоках 18-23, путем пересечения элементов множества  $R$  и  $L$ , а также  $Z$ , осуществляется формирование элементов множества  $Z$  с учетом положения № 2 по модификации алгоритма Дейкстры. В блоке 25 осуществляется ранжировка дополнительных маршрутов по сумме весов, входящих в их состав ребер.

### Моделирование формирования маршрутов полета БЛА и оценка выигрыша по показателю устойчивости маршрутного управления БЛА

В качестве исходных данных для моделирования была использована тактическая ситуация, представленная на рис. 1-2, в предположении, что в отсутствии учета системой управления БЛА местоположения средств ПВО и РЭП маршрут полета выбирается в виде кратчайшей прямой – см. рис. 1.

Наличие дополнительных маршрутов полета в количестве  $k \geq 1$  ведет к повышению значения вероятности устойчивости маршрутного управления БЛА [29]:

$$P_{y1} < P_{y1+k}.$$

Где значение вероятности устойчивого управления на одиночном маршруте из  $n$  маршрутных точек (узловых точек геотопологической модели зоны полета БЛА на ТВД) БЛА  $P_{y1}$  будет определяться вероятностью успешного сохранения управления во всех  $v$ -ых маршрутных точках:

$$P_{y1} = 1 - \left( 1 - \prod_{v=1}^n \left( (1 - P_{\text{пор } v}) (1 - P_{\text{под } v}) \right) \right),$$

а на множестве из нескольких маршрутов вероятность устойчивости управления БЛА на основном маршруте  $n_{\text{осн}}$  и на  $k$  дополнительных маршрутах  $P_{y\ 1+k}$  определяется:

$$P_{y\ 1+k} = 1 - \left( 1 - \prod_{v=1}^{n_{\text{осн}}} (1 - P_{\text{пор } v}) (1 - P_{\text{под } v}) \right) \prod_{j=1}^k \left[ 1 - \prod_{i=1}^{n_j} (1 - P_{\text{пор } i,j}) (1 - P_{\text{под } i,j}) \right],$$

где:  $P_{y\ 1+k}$  – вероятность нарушения управления БЛА на основном маршруте полета БЛА и на всех  $k$  дополнительных маршрутах;  $n_{\text{осн}}$  – количество маршрутных точек (узловых точек геотопологической модели зоны полетов на ТВД) на основном маршруте полета БЛА;  $k$  – количество дополнительных альтернативных маршрутов полета БЛА;  $n_j$  – количество маршрутных точек (узловых точек геотопологической модели зоны полетов на ТВД) на  $j$ -ом дополнительном маршруте полета БЛА;  $v, i$  – номера маршрутных точек (узловых точек геотопологической модели зоны полетов на ТВД) основного и дополнительных маршрутов, соответственно.

Учитывая это, проведем сравнение, только основных маршрутов, формируемых с учетом и без учета факторов РЭП. При этом надо понимать, что реальное значение выигрыша будет еще больше, в случае если будет учитываться и все множество дополнительных маршрутов, формируемых в соответствии с методикой формирования маршрутов полета БЛА.

Результаты проведенного моделирования формирования маршрута БЛА в обход средств ПВО и РЭП приведено на рис. 4. В качестве критериальных значений использовались ограничения: допустимая вероятность поражения БЛА средствами ПВО  $P_{\text{пор}}^{\text{крит}} = 0,3$ ; допустимая вероятность подавления КРУ БЛА средствами РЭП  $P_{\text{под}}^{\text{крит}} = 0,5$ . Значения вероятностей поражения средствами ПВО и подавления средствами РЭП для каждого номера маршрутной точки (узловой точки геотопологической модели зоны полетов на ТВД), а также результирующие значения  $P_y$  для каждого из основных маршрутов, а также итоговое значения выигрыша показано в таблице 1.

Таблица 1 – Сравнительный анализ основных маршрутов БЛА без учета и с учетом факторов ПВО и РЭП

Параметры маршрутов		Номера маршрутных точек													Итого
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	
без учета ПВО и РЭП	$P_{\text{пор } v}$	0	0	0,2	0,7	0,7	0,5	0	0	–	–	–	–	–	0,00288
	$P_{\text{под } v}$	0,5	0,8	0,2	0	0	0	0	0	–	–	–	–	–	
с учетом ПВО и РЭП	$P_{\text{пор } v}$	0	0	0	0	0	0,1	0,3	0,1	0,2	0,1	0	0	0	0,408
	$P_{\text{под } v}$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	

Отметим, что якобы низкие значения  $P_y$  на маршрутах обусловлены тем, что в качестве моделируемого месторасположения средств ПВО и РЭП на ТВД было использовано местоположение соответствующих средств в эпизоде применения комплексов РЭП «Житель» и «Лесочек», а также ЗРК «Панцирь-С1» против разведывательных БЛА «Орлан-10» при проведении стратегических учений «Запад-2017». А данный эпизод, был ориентирован на проверку действий боевых расчетов комплексов РЭП и ПВО против БЛА и по сценарию учений не предполагал высокой устойчивости БЛА. Однако даже в такой, заведомо неблагоприятной тактической ситуации, применение разработанных в диссертационной работе методик показывает существенное повышение устойчивости маршрутного управления БЛА.

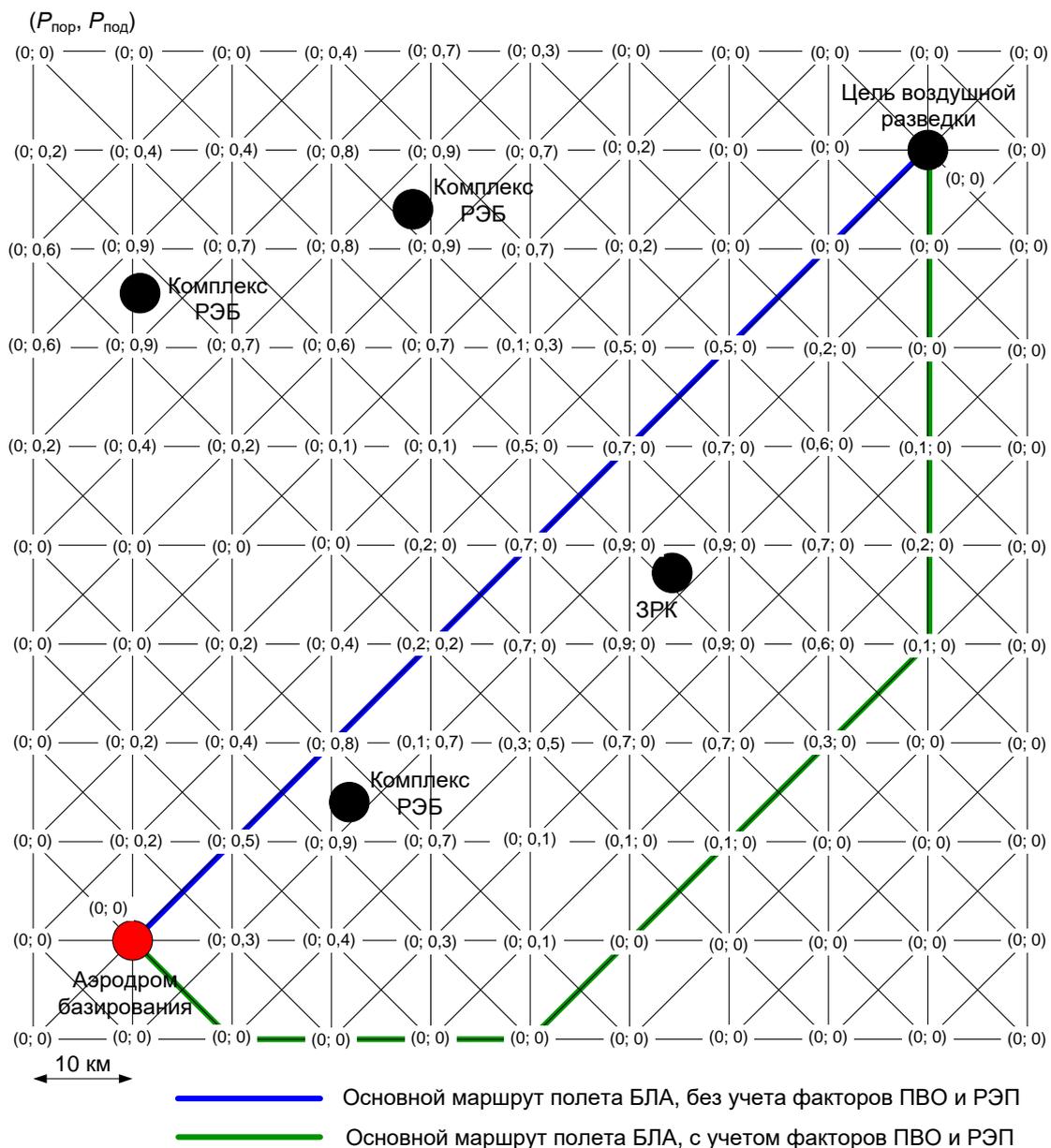


Рис. 4 – Пример формирования основных маршрутов БЛА без учета и с учетом факторов ПВО и РЭП

При многократном моделировании достигаемого выигрыша в условиях различных тактических ситуациях, удалось установить следующие. Полученные значения вероятности устойчивости маршрутного управления БЛА  $P_y$  относятся только к заданным тактическим условиям: месторасположению аэродрома базирования и объекта воздушной разведки, мест расположения средств ПВО и РЭП. В общем случае значения вероятности устойчивости маршрутного управления БЛА  $P_y$  строго индивидуальны для каждого варианта тактической обстановки. На ТВД без средств ПВО и РЭП значения вероятности устойчивости маршрутного управления с учетом и без учета факторов ПВО и РЭП будут совпадать, а значение выигрыша по показателю  $\Delta P_y$  будет равно нулю.

### Выводы

Представленное в статье решение позволяет на основе геотопологической модели зоны полетов БЛА на ТВД формировать множество маршрутов полетов БЛА с ранжированием маршрутов по степени устойчивости управления, тем самым учитывая фактор потенциальной потери управления при воздействии на КРУ БЛА средств РЭП. При этом зоны ПВО полностью исключаются из рассмотрения при формировании маршрутов БЛА, путем усечения графа геотопологической модели зоны полетов, а зоны РЭП используются для формирования маршрутов, но при этом выбирается такой маршрут полета БЛА на котором суммарное значение вероятности подавления КРУ минимальное. Таким образом, этот маршрут соответствует пути полета с максимальной устойчивостью управления БЛА.

Элементами новизны данной методики, которые отличают ее как от известного алгоритма Дейкстры [16], так и от других теоретических решений в области формирования маршрутов полета БЛА с обходом препятствий и опасных зон, представленных в работах [9-14], является то, что в состав нее введены дополнительные операции, позволяющие формировать помимо кратчайшего маршрута еще и упорядоченное множество дополнительных маршрутов полета, которые формируются в обход зон ПВО и ранжируются по уровню устойчивости управления БЛА на маршруте, который, в свою очередь, оценивается вновь введенным показателем качества маршрута – суммарной вероятностью подавления КРУ БЛА на маршруте.

Наиболее близкими работами по сути предложенной методики формирования маршрутов полета БЛА с учетом месторасположения средств ПВО и РЭП являются работы А.Н. Попова, Д.П. Тетерина [13], С.И. Макаренко [17-21], Р.Л. Михайлова [21, 22]. Однако, в работе А.Н. Попова и Д.П. Тетерина [13] при решении задачи формирования маршрута БЛА с учетом опасных зон противодействия противника не используются математические методы теории графов и алгоритмы поиска кратчайших путей. В работе [13] задача формирования маршрутов полета решается путем приближенного решения динамической системы дифференциальных уравнений, описывающих пространственное движение БЛА, при этом специфика средств ПВО и РЭП в работе [13] не рассматривается. В работах С.И. Макаренко [17-21] и Р.Л. Михайлова [21, 22] при решении задач маршрутизации информационных потоков в сети, используются

методы теории графов, в том числе и модификация алгоритма Дейкстры, однако эти работы ориентированы исключительно на прикладную область телекоммуникационных сетей, соответственно особенности маршрутного управления БЛА на ТВД, а также факторы совместного воздействия средств ПВО и РЭП [30] в них также не рассматриваются.

Дальнейшим направлением исследования является анализ функционирования системы «ПУ – БЛА» в условиях воздействия деструктивных факторов как сложной системы, с применением элементов научно-методического аппарата теории координации [31].

### Литература

1. Макаренко С. И., Иванов М. С. Сетецентрическая война – принципы, технологии, примеры и перспективы. Монография. – СПб.: Научное издание, 2018. – 898 с.
2. Макаренко С. И. Робототехнические комплексы военного назначения – современное состояние и перспективы развития // Системы управления, связи и безопасности. 2016. № 2. С. 73-132.
3. Мазулин Г. А. Использование беспилотных летательных аппаратов министерства обороны Вооружённых сил РФ в Сирии // Проблемы развития корабельного вооружения и судового радиоэлектронного оборудования. 2017. № 2 (11). С. 43-50.
4. Абрамов В. Н. Боевое применение и боевая эффективность авиационных комплексов войск ПВО страны / Под ред. В.Н. Абрамова. – М.: Военное издательство МО СССР, 1979. – 520 с.
5. Арбузов И. В., Болховитинов О. В., Волочаев О. В., Вольнов И. И., Гостев А. В., Мышкин Л. В., Хабиров Р. Н., Шеховцов В. Л. Боевые авиационные комплексы и их эффективность: учебник для слушателей и курсантов инженерных ВУЗов ВВС / Под ред. О.В. Болховитинова. – М.: ВВИА им. проф. Н.Е. Жуковского, 2008. – 224 с.
6. Казамбаев, М. К., Куатов Б. Ж. Некоторые вопросы использования беспилотных летательных аппаратов // Надежность и качество сложных систем. 2017. № 4 (20). С. 97-100. DOI 10.21685/2307-4205-2017-4-13.
7. Казарьян Б. И. Беспилотные аппараты. Способы применения в составе боевых систем // Военная мысль. 2012. № 3. С. 21-26.
8. Ростопчин В. В. Ударные беспилотные летательные аппараты и противовоздушная оборона – проблемы и перспективы противостояния // Беспилотная авиация [Электронный ресурс]. 2019. – URL: [https://www.researchgate.net/publication/331772628\\_Udarnye\\_bespilotnye\\_letatelnye\\_apparaty\\_i\\_protivovozdusnaa\\_oborona\\_-\\_problemy\\_i\\_perspektivy\\_protivostoania](https://www.researchgate.net/publication/331772628_Udarnye_bespilotnye_letatelnye_apparaty_i_protivovozdusnaa_oborona_-_problemy_i_perspektivy_protivostoania) (дата обращения 20.05.2019).
9. Батраева И. А. Тетерин Д. П. Алгоритм планирования траектории движения беспилотного летательного аппарата при выполнении поисково-спасательных операций // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2018. Т. 20. № 6. С. 210-214

10. Зубов Н. П. Проблемные вопросы навигации и наведения роботизированных летательных аппаратов // Новости навигации. 2011. № 2. С. 29-33.

11. Козуб А. Н., Кучеров Д. П. Интеграционный подход к задаче выбора маршрута группы БПЛА // Системы и средства искусственного интеллекта. 2013. № 4. С. 333-343.

12. Лебедев Г. Н., Румакина А.В. Система логического управления обхода препятствий беспилотным летательным аппаратом при маршрутном полете // Труды МАИ. 2015. № 83. С. 5.

13. Попов А. Н., Тетерин Д. П. Методы планирования траектории движения беспилотного летательного аппарата с учетом противодействия противника // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2017. Т. 19. № 1-2. С. 371-376.

14. Яковлев К. С., Баскин Е. С., Андрейчук А. А. Метод автоматического планирования совокупности траекторий для навигации беспилотных транспортных средств // Управление большими системами. 2015. № 58. С. 306-342.

15. Свами М., Тхуласираман К. Графы, сети и алгоритмы. – М.: Мир, 1984. – 454 с.

16. Кормен, Т., Лейзерсон Ч., Ривест Р. Алгоритмы: построение и анализ. – М.: МЦНМО, 2000. – 960 с.

17. Макаренко С. И. Метод обеспечения устойчивости телекоммуникационной сети за счет использования ее топологической избыточности // Системы управления, связи и безопасности. 2018. № 3. С. 14-30.

18. Макаренко С. И. Усовершенствованный протокол маршрутизации OSPF, обеспечивающий повышенную устойчивость сетей связи // Труды учебных заведений связи. 2018. Т. 4. № 2. С. 82-90.

19. Макаренко С. И. Усовершенствованный протокол маршрутизации EIGRP, обеспечивающий повышенную устойчивость сетей связи // Труды учебных заведений связи. 2018. Т. 4. № 3. С. 65-73. DOI: 10.31854/1813-324X-2018-4-3-65-73.

20. Макаренко С. И., Квасов М. Н. Модифицированный алгоритм Беллмана-Форда с формированием кратчайших и резервных путей и его применение для повышения устойчивости телекоммуникационных систем // Инфокоммуникационные технологии. 2016. Т. 14. № 3. С. 264-274. DOI: 10.18469/ikt.2016.14.3.06.

21. Цветков К. Ю., Макаренко С. И., Михайлов Р. Л. Формирование резервных путей на основе алгоритма Дейкстры в целях повышения устойчивости информационно-телекоммуникационных сетей // Информационно-управляющие системы. 2014. № 2 (69). С. 71-78.

22. Михайлов Р. Л. Помехозащищенность транспортных сетей связи специального назначения. Монография. – Череповец: ЧВВИУРЭ, 2016. – 128 с.

23. Белоус Р. А., Скоков А. Л. Некоторые особенности ПВО в условиях массового применения противником комплексов БЛА и ВТО // Военная мысль. 2013. № 6. С. 64-71.

24. Макаренко С. И., Иванов М. С., Попов С. А. Помехозащищенность систем связи с псевдослучайной перестройкой рабочей частоты. Монография. – СПб.: Свое издательство, 2013. – 166 с.

25. Федосеев В. Е., Иванов М. С. Методика и результаты анализа потенциальной помехоустойчивости приема цифрового сигнала на фоне манипулированной структурной помехи // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2010. Т. 6. № 11. С. 108-111.

26. Федосеев В. Е., Иванов М. С. Синтез демодулятора с оптимальной компенсацией структурной прерывистой помехи // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2010. Т. 6. № 10. С. 91-94.

27. Макаренко С. И., Михайлов Р. Л., Новиков Е. А. Исследование канальных и сетевых параметров канала связи в условиях динамически изменяющейся сигнально-помеховой обстановки // Журнал радиоэлектроники. 2014. № 10. С. 2.

28. Васильченко А. С., Иванов М. С., Малышев В. А. Формирование полетных зон беспилотных летательных аппаратов по степени устойчивости управления ими в условиях применения средств противовоздушной обороны и радиоэлектронного подавления // Системы управления, связи и безопасности. 2019. № 4. С. 262-279. DOI: 10.24411/2410-9916-2019-10410.

29. Михайлов Р. Л., Макаренко С. И. Оценка устойчивости сети связи в условиях воздействия на неё дестабилизирующих факторов // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. 2013. № 4 (12). С. 69-79.

30. Михайлов Р. Л. Радиоэлектронная борьба в Вооруженных силах США. – СПб: Наукоемкие технологии, 2018. – 131 с.

31. Михайлов Р. Л. Анализ научно-методического аппарата теории координации и его использования в различных областях исследований // Системы управления, связи и безопасности. 2016. № 4. С. 1-29.

## References

1. Makarenko S. I., Ivanov M. S. *Setecentricheskaya vojna – principy, tekhnologii, primery i perspektivy. Monografiya* [Network-centric warfare - principles, technologies, examples and perspectives. Monograph]. – Saint Petersburg, Naukoemkie Tekhnologii Publ., 2018. – 898 p. (in Russian).

2. Makarenko S. I. Military Robots – the Current State and Prospects of Improvement. *Systems of Control, Communication and Security*, 2016, no. 2, pp. 73-132 (in Russian).

3. Mazulin G. A. Ispol'zovanie bespilotnykh letatel'nykh apparatov ministerstva oborony Vooruzhennykh sil RF v Sirii [The use of unmanned aerial vehicles of the Ministry of defense of the Armed forces of the Russian Federation in Syria]. *Problemy razvitiya korabel'nogo vooruzheniya i sudovogo radioelektronnogo oborudovaniya*, 2017, vol. 11, no. 2, pp. 43-50 (in Russian).

4. Abramov V. N. Boevoe primeneniye i boevaya effektivnost' aviacionnykh kompleksov vojsk PVO strany [Combat use and combat effectiveness of air defense systems of the country]. Moscow, Voennoye izdatelstvo, Ministry of defence USSR, 1979. 520 p. (in Russian).

5. Arbuzov I. V., Bolkhovitinov O. V., Volochaev O. V., Vol'nov I. I., Gostev A. V., Myshkin L. V., Khabirov R. N., Shekhovtsov V. L. *Boevye aviatsionnyye komplekсы i ikh effektivnost': uchebnik dlya slushateley i kursantov inzhenernykh VUZov VVS* [Combat Aircraft Systems and their Effectiveness: a Textbook for Cadets of Engineering Universities of the Air Force]. Moscow, Air force engineering Academy named after Professor N.E. Zhukovskogo, 2008. – 224 p. (in Russian).

6. Kazambaev M. K., Kumatov B. Zh. Some Questions on Use of Unmanned Aircraft Vehicles. *Reliability and Quality of Complex Systems*, 2017, no. 4 (20), pp. 97-100 (in Russian). DOI 10.21685/2307-4205-2017-4-13.

7. Kazarian B. I. Bepilotnyye apparaty. Sposoby primeneniya v sostave boevykh system [Drones. Methods of application as part of combat systems]. *Military Thought*, 2012, no. 3, pp. 21-26 (in Russian).

8. Rostopchin V. V. Udarnye bepilotnyye letatel'nye apparaty i protivovozdushnaya oborona – problemy i perspektivy protivostoianiya. [Strike unmanned aerial vehicles and air defense-problems and prospects of confrontation]. *ResearchGate.net* Available at: [https://www.researchgate.net/publication/331772628\\_Udarnye\\_bepilotnyye\\_letatelnye\\_apparaty\\_i\\_protivovozdusnaya\\_oborona\\_-\\_problemy\\_i\\_perspektivy\\_protivostoianiya](https://www.researchgate.net/publication/331772628_Udarnye_bepilotnyye_letatelnye_apparaty_i_protivovozdusnaya_oborona_-_problemy_i_perspektivy_protivostoianiya) (accessed 20 may 2019).

9. Batraeva I. A, Teterin D.P. Traxer Planning Algorithm Movements of a Free Flying Apparatus. *Izvestia of Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*, 2018, vol. 20, no. 6, pp.210-214 (in Russian).

10. Zubov N. P. Problems of Navigation and Guidance of Robotic Flying Vehicles. *Novosti Navigacii*, 2011, no. 2, pp. 29-33(in Russian).

11. Kozub A. N., Kucherov D. P. Integrated approach to the problem of planning the route of UAV. *Artificial intelligence*, 2013, no. 4, pp. 333-343 (in Russian).

12. Lebedev G. N., Roumakina A. V. Logic control system to avoid obstructions unmanned aerial vehicle during cross-country flights. *Trudy MAI*, 2015, no. 83, pp. 5 (in Russian).

13. Popov A. N., Teterin D. P. Planning Methods of Movement Trajectory of Unmanned Aerial Vehicle Due to Counteraction of the Opponent. *Izvestia of Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*, vol. 19, no. 1-2, pp. 371-376 (in Russian).

14. Yakovlev K. S, Baskin E.S., Andreychuk A. A Dynamics Constraint-Aware Planning of Multiple Paths for Unmanned Vehicle. *Large-scale Systems Control*, 2015, no. 58, pp. 306-342 (in Russian).

15. Swamy M. N. S., Thulasiraman K. Graphs, networks, and algorithms. – John Wiley & Sons, 1981.

16. Leiserson C. E., Rivest R. L., Cormen T. H., Stein C. *Introduction to algorithms*. – Cambridge, MA, MIT press, 2001.

17. Makarenko S. I. Stability method of telecommunication network with using topological redundancy. *Systems of Control, Communication and Security*, 2018, no. 3, pp. 14-30 (in Russian).

18. Makarenko S. I. The Improved OSPF Protocol for High Network Stability. *Proceedings of Telecommunication Universities*, 2018, vol. 4, no. 2, pp. 82-90 (in Russian).

19. Makarenko S. I. The Improved EIGRP Protocol for High Network Stability. *Proceedings of Telecommunication Universities*, 2018, vol. 4, no. 3, pp. 65-73 (in Russian). DOI: 10.31854/1813-324X-2018-4-3-65-73.

20. Makarenko S. I., Kvasov M. N. Modified Bellman-Ford Algorithm with Finding the Shortest and Fallback Paths and its Application for Network Stability Improvement. *Infokommunikacionnye tehnologii*, 2016, vol. 14, no. 3, pp. 264-274 (in Russian). DOI: 10.18469/ikt.2016.14.3.06.

21. Tsvetsov K. U., Makarenko S. I., Mikhailov R. L. Forming of Reserve Paths Based on Dijkstra's Algorithm in the Aim of the Enhancement of the Stability of Telecommunication Networks. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy*, 2014, vol. 69, no. 2, pp. 71-78 (in Russian).

22. Mikhailov R. L. *Pomekhozashchishchennost' transportnykh setei svyazi spetsial'nogo naznacheniiia. Monografiia* [Noise immunity of transport networks for special purposes. Monograph]. Cherepovets, The Cherepovets higher military engineering school of radio electronics, 2016. 128 p. (in Russian).

23. Belous R. A., Sizov Ju. G., Skokov A. L. Nekotorye osobennosti PVO v usloviyah massovogo primeneniya protivnikom kompleksov BLA i VTO [Some Features of Air Defense in the Conditions of Mass Application by the Enemy of UAV and WTO Complexes]. *Military Thought*, 2013, no. 6, pp. 64-71 (in Russian).

24. Makarenko S. I., Ivanov M. S., Popov S. A. *Pomekhozashchishchennost' sistem svyazi s psevdosluchainoi perestroikoi rabochei chastity*. Monografiya [Interference Resistance Communication Systems with Frequency-Hopping Spread Spectrum. Treatise]. Saint Petersburg, Svoe Izdatelstvo Publ., 2013, 166 p. (in Russian).

25. Fedoseev V. E., Ivanov M. S. Technique and Results of the Analysis of the Potential Noise Stability of Reception of the Digital Signal Against the Manipulated Structural Hindrance. *Voronezh State Technical University Bulletin*, 2010, vol. 6, no. 11, pp. 108-111 (in Russian).

26. Fedoseev V. E., Ivanov M. S. Synthesis of the Demodulator with Optimum Indemnification of the Structural Faltering Hindrance. *Voronezh State Technical University Bulletin*, 2010, vol. 6, no. 10, pp. 91-94 (in Russian).

27. Makarenko S. I., Mikhailov R. L., Novikov E. A. The research of data link layer and network layer parameters of communication channel in the conditions of dynamic vary of the signal and noise situation. *Journal of Radio Electronics*, 2014, no. 10. Available at: <http://jre.cplire.ru/jre/oct14/3/text.pdf> (accessed 21 October 2019) (in Russian).

28. Vasilchenko A. S., Ivanov M. S., Malyshev V. A. Unmanned aerial vehicles flight zones formation, based on their control stability degree in air defense and electronic warfare conditions. *Systems of Control, Communication and Security*, 2019, no. 4, pp. 262-279 (in Russian). DOI: 10.24411/2410-9916-2019-10410.

29. Mikhailov R. L., Makarenko S. I. Estimating Communication Network Stability under the Conditions of Destabilizing Factors Affecting it. *Radio and telecommunication systems*, 2013, no. 4, pp. 69-79 (in Russian).

30. Mikhailov R. L. *Radioelektronnaja bor'ba v vooruzhennyh silah SShA*. [Electronic warfare in the U.S. Armed forces]. Saint Petersburg, Naukoemkie tehnologii Publ., 131 p. (in Russian).

31. Mikhailov R. L. An Analysis of the Scientific and Methodological Apparatus of Coordination Theory and its Use in Various Fields of Study. *Systems of Control, Communication and Security*, 2016, no. 4, pp. 1-29. Available at: <http://sccs.intelgr.com/archive/2016-04/01-Mikhailov.pdf> (accessed 10 October 2019) (in Russian).

Статья поступила 2 декабря 2019 г.

### Информация об авторах

*Васильченко Александр Сергеевич* – адъюнкт кафедры эксплуатации авиационного оборудования. Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж). Область научных интересов: системы искусственного интеллекта; системы автоматического управления воздушных судов; маршрутное управление беспилотными летательными аппаратами. E-mail: vasilchenkoas@rambler.ru

*Иванов Максим Сергеевич* – кандидат технических наук. Старший преподаватель кафедры эксплуатации бортового авиационного радиоэлектронного оборудования. Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж). Область научных интересов: системы искусственного интеллекта; системы автоматического управления воздушных судов; маршрутное управление беспилотными летательными аппаратами. E-mail: point\_break@rambler.ru

Адрес: Россия, 394064, г. Воронеж, ул. Старых Большевиков 54а.

*Колмыков Геннадий Николаевич* – кандидат военных наук. Начальник отдела. АО «НИИ «Вектор». Область научных интересов: системы радиоэлектронного мониторинга; беспилотные летательные аппараты. E-mail: nio77@nii-vector.ru

Адрес: Россия, 197376, Санкт-Петербург, ул. Академика Павлова, д. 14а.

## Unmanned aerial vehicles flight routes formation, taking into account the location of air defense and electronic warfare means

A. S. Vasilchenko, M. S. Ivanov, G. N. Kolmykov

**Relevance.** *Combat use of special purpose unmanned aerial vehicles (UAVs) usually happens in theaters of operations (TO), which are equipped with air defense (AD) and electronic warfare (EW). The aim of the paper is to increase the survivability of UAVs and stability of their control in TO which are equipped with AD and EW facilities. Results.* *The method of formation UAV's flight routes which are pass out of the location zones of AD and EW means is proposed in the article. Such UAV's flight routes are based on the Dijkstra's algorithm, which allows to form the main and additional routes in TO. AD and EW zones are taken into account in the UAVs automated route control when the UAVs flight route, which passes out of these zones, is formed. Novelty.* *The novelty of this decision is the consideration of the AD and EW locations as well as the AD and EW impact consideration. These factors are formalized in the form of integral metric of graph nodes of the geotopological model of the flight zone in TO. Practical significance of the work.* *The method allows to increase the stability of UAVs control at their flights in TO equipped with AD and EW means.*

**Keywords:** *flight route, unmanned aerial vehicle, control stability, geotopological model, theater of operations, air defense, electronic suppression, electronic warfare.*

### Information about Authors

*Aleksandr Sergeevich Vasilchenko* – Doctoral Candidate of Department of Exploitation of Aviation Equipment. Military Training and Research Center of the Air Force "Air Force Academy named after Professor N.E. Zhukovsky and Yu. A. Gagarin" (Voronezh). Field of scientific interests: artificial intelligence systems; automatic control systems of aircraft; route control of unmanned aerial vehicles. E-mail: vasilchenkoas@rambler.ru

*Maxim Sergeevich Ivanov* – Ph.D. of Engineering science. Senior lecturer of Department of Exploitation of Onboard Aviation Radio-electronic Equipment. Military Training and Research Center of the Air Force "Air Force Academy named after Professor N.E. Zhukovsky and Yu. A. Gagarin" (Voronezh). Field of scientific interests: artificial intelligence systems; automatic control systems of aircraft; route control of unmanned aerial vehicles. E-mail: point\_break@rambler.ru

Address: Russia, 394064, Voronezh, Stariy Bolshevikov str. 54A.

*Gennady Nikolaevich Kalmykov* – Ph.D. of Military science. Head of Department. Research Institute "Vector". Field of scientific interests: electronic monitoring systems; unmanned aerial vehicles. E-mail: nio77@nii-vector.ru

Address: Russia, 197376, Saint Petersburg, 14a, Akademika Pavlova str.