

УДК 623.618

## Формирование полетных зон беспилотных летательных аппаратов по степени устойчивости управления ими в условиях применения средств противовоздушной обороны и радиоэлектронного подавления

Васильченко А. С., Иванов М. С., Малышев В. А.

**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 формализованного формирования зон ПВО и РЭП на основе методов теории кластеризации. В дальнейшем зоны ПВО и РЭП учитываются при автоматизированном маршрутном управлении БЛА путем формирования маршрута полета БЛА в обход этих зон. **Новизна.** Новизной данного решения, отличающей его от известных работ в области формирования маршрутов полетов БЛА, является учет в качестве препятствий для полета БЛА двух типов дестабилизирующих факторов – воздействие средств ПВО и воздействие средств РЭП. Эти факторы формализуются в виде интегральной метрики узлов графа геотопологической модели зоны полетов на ТВД. При этом для формирования «бесполетных» зон, в которых высока вероятность поражения БЛА, и зон нарушения управления им, вследствие воздействия средств РЭП, используется математический алгоритм иерархической кластеризации Ланса-Вильямса. Проверка связности маршрутной сети основана на методе определения сильносвязных областей графа. **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.

### Введение

Анализ опыта применения беспилотных летательных аппаратов (БЛА) в последних локальных военных конфликтах, а также опыт применения БЛА в операции Воздушно-космических сил (ВКС) РФ в Сирии показал, 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

---

#### Библиографическая ссылка на статью:

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.

#### Reference for citation:

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. DOI: 10.24411/2410-9916-2019-10410 (in Russian).

радиоэлектронного подавления (РЭП) командной радиолинии управления (КРУ) между пунктом управления (ПУ) и БЛА.

Анализ известных работ и технологических решений показывает, что в подавляющем числе работ живучесть БЛА в условиях применения по ним ЗРК ПВО и помехоустойчивость КРУ БЛА в условиях применения средств РЭП рассматриваются без учета возможностей пространственного маневра БЛА с целью обхода зон ПВО и РЭП. В существующих автоматизированных системах управления (АСУ) БЛА не учитываются, возможности по заблаговременному формированию «бесполётных» зон, в которых вероятность поражения средствами ЗРК ПВО выше безопасного значения, а также автоматизированного формирования таких маршрутов полета БЛА, которые обеспечивают требуемый уровень устойчивости управления по КРУ «ПУ – БЛА» в том числе в условиях воздействия средств РЭП. Вместе с тем, именно пространственная маневренность и скрытность БЛА должна быть положена в основу их гибкого боевого применения, а устойчивость управления БЛА должна достигаться в числе прочего и маршрутным маневром с целью обхода зон заведомого тактического преимущества противника.

Целью данной работы является разработка теоритических решений, направленных на формализованное формирование зон ПВО и РЭП на ТВД, на основе методов теории кластеризации для последующего учета этих зон при автоматизированном формировании маршрутов полета БЛА.

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

Общим проблемам управления авиацией посвящены работы научных школ академика РАН Е.А. Федосова [1], члена-корреспондента РАН В.С. Вербы [2, 3]. Основам организации радиоуправления ЛА и БЛА посвящены работы научной школы В.И. Меркулова [5, 6].

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 [7, 8], М.К. Казамбаева, Б.Ж. Куатова [9], Б.И. Казарьяна [10], В.В. Ростопчина [11]. Опыт реального боевого применения БЛА, а также мнение ведущих специалистов по радиоуправлению БЛА – В.С. Вербы и В.И. Меркулова [1-6], показывает, что для управления БЛА первостепенное значение имеет обеспечение непрерывной устойчивой связи с ними, а также обход управляемыми БЛА районов тактического преимущества противника – зон ПВО и РЭП.

Анализ данных работ показывает, что проблематика оценки уязвимости БЛА к воздействию боевых факторов ПВО и РЭП является чрезвычайно актуальной и относительно новой, что подтверждается тем, что первые теоритические работы в этой области относятся к периоду не ранее 2012 года.

Необходимо отметить, что общий подход к маршрутному управлению БЛА с обходом опасных зон и препятствий не является принципиально новым. В настоящее время, известны работы: И.А. Батраевой, Д.П. Тетерина [12], Н.П. Зубова [13], А.Н. Козуба, Д.П. Кучерова [14], Г.Н. Лебедева, А.В. Румакина [15], А.Н. Попова [16], К.С. Яковлева, Е.С. Баскина, А.А. Андрейчука [17].

В этих работах рассматриваются вопросы формирования маршрутов полета БЛА, в том числе с облетом препятствий, а также с учетом различного рода дестабилизирующих факторов, таких как неровности поверхности Земли, боковой ветер, условия городской застройки. Однако во всех вышеуказанных работах, за исключением работы [16], в качестве препятствий не рассматривались зоны противодействия полету БЛА со стороны противника. Ближайшим аналогом решения задачи формирования маршрута полета БЛА в обход зон противодействия противника, решаемой в данной работе, является работа [16]. Однако задача формирования маршрута БЛА в обход зон противодействия противника в работе [16] ставится не как задача кластеризации, а как задача численного приближенного решения динамической системы дифференциальных уравнений, описывающих пространственное движение БЛА, при этом специфика средств ПВО и РЭП в работе [16] не рассматривается.

Анализ практики управления БЛА показал, что в практике их эксплуатации зачастую «бесполётные» зоны назначаются в административном порядке, либо эвристически формируются операторами АСУ БЛА в соответствии с собственным пониманием складывающейся тактической обстановки. Одним из подходов к решению задачи научно-обоснованного формирования зон ПВО и РЭП является группирование узлов геотопологической модели в отдельные множества, называемые кластерами. Решение задачи декомпозиции сети на отдельные кластеры является довольно стандартным подходом в предметной области телекоммуникационных сетей. В частности, подходы к кластеризации телекоммуникационных сетей представлены в работах [18-20]. В интересах решения поставленной в данной статье задачи предлагается воспользоваться вышеуказанными подходами, связанными с декомпозицией графа на отдельные кластеры, для решения задачи выделения на геотопологической модели ТВД областей, в которых БЛА подвергаются воздействию средств ПВО и РЭП. Использование вышеуказанных известных теоретических подходов в новой области – в области управления БЛА на ТВД в условиях применения средств ПВО и РЭП, формирует основные элементы научной новизны результатов данной работы.

### **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 БЛА управляющих команд.

Данные факторы могут быть формализованы через соответствующие показатели – вероятность поражения БЛА средствами ПВО ( $P_{пор}$ ) и вероятность подавления КРУ БЛА средствами РЭП ( $P_{под}$ ). Предметом данной работы не является разработка методик определения  $P_{пор}$  и  $P_{под}$ . Для определения этих веро-

ятностей можно использовать известные работы в области оценки живучести БЛА в условиях применения против них ЗРК ПВО [11, 21], а также результаты известных работ в области оценки помехозащищенности систем радиосвязи [11, 22-27].

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.

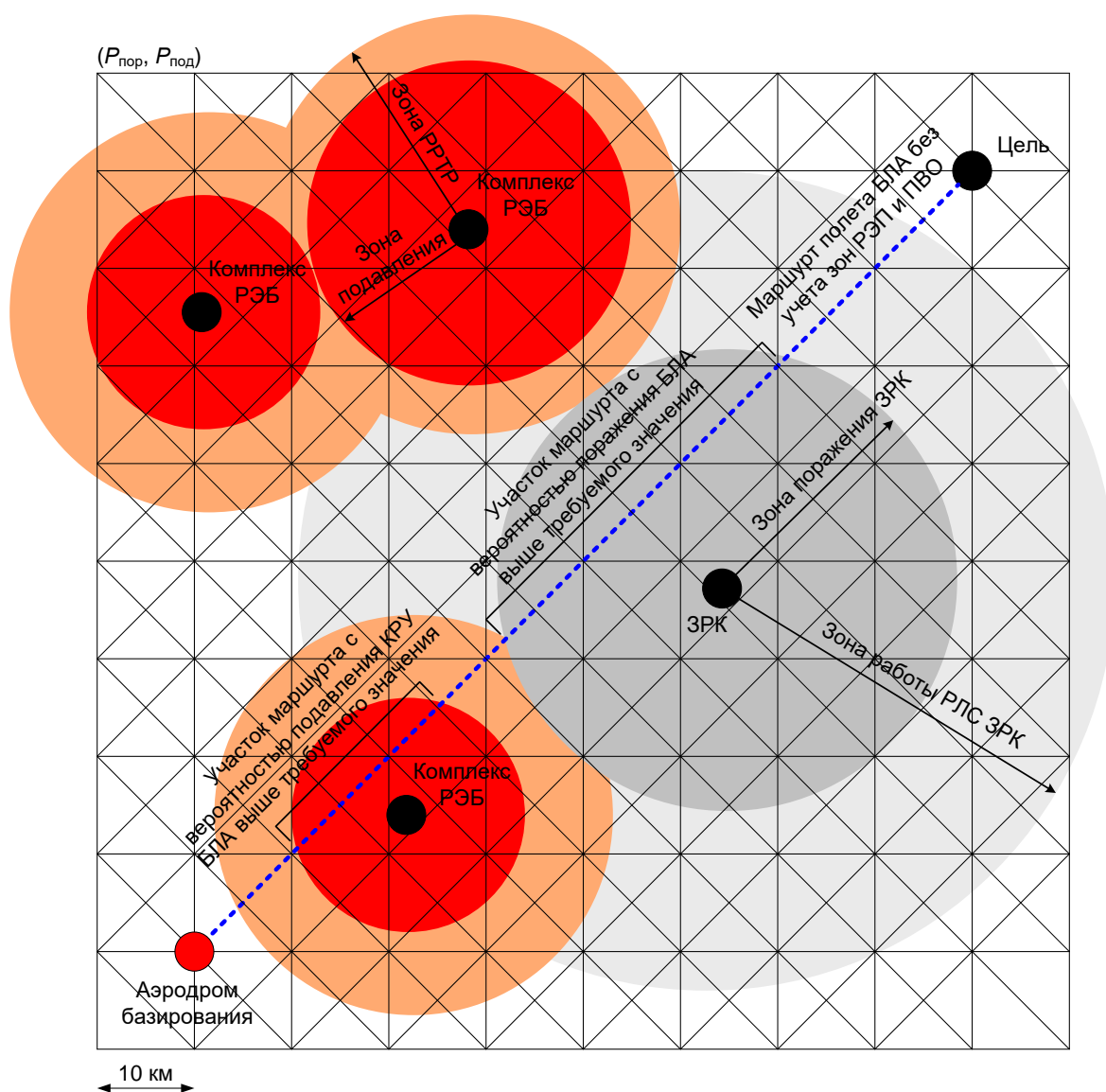


Рис. 1. Зона полетов БЛА на ТВД

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.

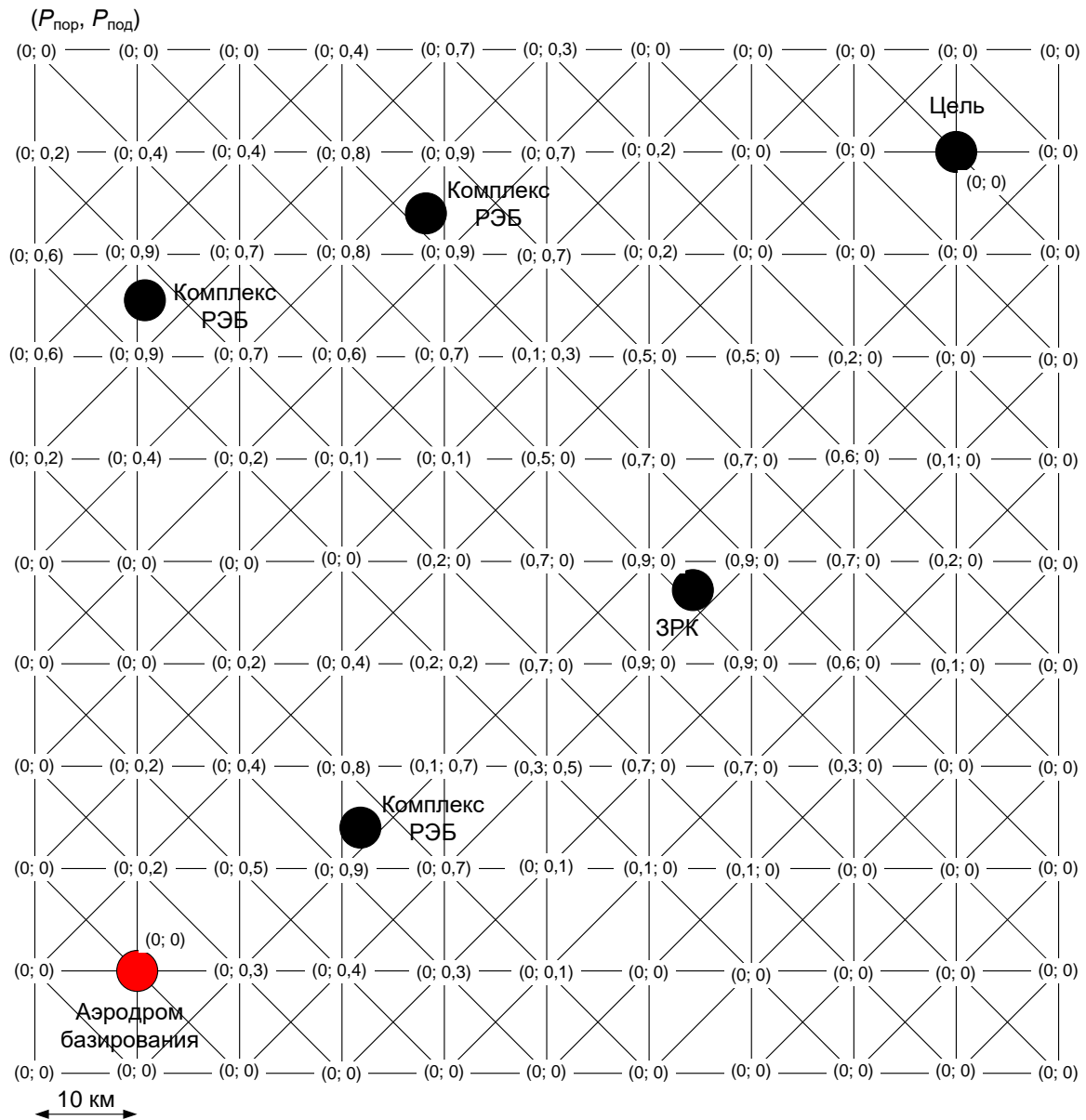


Рис. 2. Геотопологическая модель для тактической обстановки, представленной на рис. 1

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.

### Постановка задачи на формирование полетных зон БЛА

Для формальной постановки и решения задачи формирования полетных зон БЛА с учетом зон ПВО и РЭП введем следующие обозначения:

$c$  – кластер, являющийся множеством, содержащим узлы, классифицированные по заданному критерию;

$C = \{c\}$  – множество кластеров, содержащих узлы на различных этапах процесса кластеризации;

$G(U, V)$  – множество вершин и ребер, соответствующее исходному графу геотопологической модели;

$G^*$  – связный граф, содержащий узлы геотопологической модели, которые сохранили свойство связности с учетом месторасположения средств воздействия;

$G_t^{**}$  – множество узлов геотопологической модели, в которых вероятность воздействия на БЛА средствами  $t$ -го типа ниже критического значения: ниже  $P_{\text{пор}}^{\text{крит}}$  при  $t=1$ ; ниже  $P_{\text{под}}^{\text{крит}}$  при  $t=2$ ;

$G^{**}$  – множество узлов геотопологической модели, в которых вероятности воздействия на БЛА средствами ПВО и РЭП ниже критического значения;

$G^T$  – транспонированная матрица;

$M_{\text{крит } t}$  – максимальное значение метрики: при  $t=1$  метрика  $M_{\text{крит } 1} = P_{\text{пор}}^{\text{крит}}$ ; при  $t=2$  метрика  $M_{\text{крит } 2} = P_{\text{под}}^{\text{крит}}$ ;

$M_t$  – метрика отдельного узла графа  $G$ , соответствующая  $t$ -му типу воздействия: при  $t=1$  метрика  $M_1 = P_{\text{пор}}$ ; при  $t=2$  метрика  $M_2 = P_{\text{под}}$ ;

$M_t(u_i, u_j)$  – значение суммарной метрики  $M_t$  на пути из узла  $u_i$  в узел  $u_j$ ;

$n$  – количество узлов в графе  $G$ ;

$n^*$  – количество узлов в графе  $G^*$ ;

$R = R_{\text{ПВО}} \cup R_{\text{РЭП}}$  – множество узлов, соответствующих областям, которые подвергаются воздействию средств ПВО  $R_{\text{ПВО}}$  или средств РЭП  $R_{\text{РЭП}}$

$R_t$  – множество узлов, соответствующих областям, которые подвергаются воздействию  $t$ -го типа:  $R_1 = R_{\text{ПВО}}$  при  $t=1$ ;  $R_2 = R_{\text{РЭП}}$  при  $t=2$ ;

$R_{\text{ПВО}}$  – множество узлов, соответствующих областям, которые подвергаются воздействию ПВО;

$R_{\text{РЭП}}$  – множество узлов, соответствующих областям, которые подвергаются воздействию средств РЭП;

$s(u_i, u_j)$  – количество необходимых шагов из узла  $u_i$  для достижения узла  $u_j$ ;

$t$  – показатель типа воздействия:  $t=1$ , соответствует воздействию средств ПВО;  $t=2$ , соответствует воздействию средств РЭП;

$U = \{u\}$  – множество узлов в графе  $G$ , соответствующих узлам геотопологической модели;

$V = \{v\}$  – множество ребер в графе  $G$ , соответствующих участкам возможных маршрутов в геотопологической модели;

$Y = Y_{\text{ПВО}} \cup Y_{\text{РЭП}}$  – множество узлов, которые в результате учета факторов воздействия средств ПВО и РЭП, утратили свойство связности с графом  $G^*$ ;

$Y_t$  – множество узлов, которые в результате учета воздействия фактора  $t$ -го типа утратили свойство связности с графом  $G^*$ :  $Y_1 = Y_{\text{ПВО}}$  при  $t=1$ ;  $Y_2 = Y_{\text{РЭП}}$  при  $t=2$ ;

$Y_{\text{ПВО}}$  – множество узлов, которые в результате воздействия средств ПВО, утратили свойство связности с графом  $G^*$  и являются недоступными для БЛА;

$Y_{\text{РЭП}}$  – множество узлов, которые в результате воздействия средств РЭП, утратили свойство связности с графом  $G^*$  и являются доступными для полетов БЛА, но с возможной потерей его управляемости вследствие подавления КРУ;

$P_{\text{под } u}$  – вероятность подавления КРУ БЛА средствами РЭП при его нахождении в узле  $u$  геотопологической модели;

$P_{\text{под}}^{\text{крит}}$  – критическое значение вероятности подавления КРУ БЛА средствами РЭП, при котором реализуется угроза потери управляемости БЛА;

$P_{\text{пор } u}$  – вероятность поражения БЛА средствами ПВО при его нахождении в узле  $u$  геотопологической модели;

$P_{\text{пор}}^{\text{крит}}$  – критическое значение вероятности поражения БЛА средствами ПВО, при котором реализуется угроза потери БЛА;

$i, j, k, v, w$  – счетчики.

На вербальном уровне задача формирования зон ПВО и РЭП на ТВД может быть декомпозирована и представлена в следующем виде:

1) формирование критериальных значений опасности деструктивного воздействия средствами ПВО и РЭП на БЛА:  $P_{\text{пор}}^{\text{крит}}$  и  $P_{\text{под}}^{\text{крит}}$ ; определение для каждого  $u$ -го узла геотопологической модели пары значений  $(P_{\text{пор } u}, P_{\text{под } u})$ , соответствующих вероятностям поражения БЛА и подавления его КРУ при нахождении БЛА в месте соответствующем  $u$ -му узлу;

2) нахождения подграфа  $G^*$  графа  $G$ , для которого после учета воздействия средств ПВО и РЭП выполняется свойство связности узлов;

3) выделение в графе  $G^*$  подграфа  $G^{**}$ , который соответствует множеству узлов, которые не подвергаются воздействию средств ПВО и РЭП, и подграфа  $R = R_{\text{ПВО}} \cup R_{\text{РЭП}}$ , который соответствует множеству узлов подвергнутым воздействию средств ПВО  $R_{\text{ПВО}}$  или средств РЭП  $R_{\text{РЭП}}$ .

### Решение задачи формирования полетных зон БЛА

Задача формирования зон ПВО и РЭП решается за счет использования метода определения сильносвязных областей графа из теории графов, представленного в работе [28], и алгоритма иерархической кластеризации Ланса-Вильямса из теории кластеризации [29].

Метод определения сильносвязных областей, примененный к графу геотопологической модели  $G$  после учета вероятностей воздействия средств ПВО и РЭП, позволяет за счет поиска в глубину по матрице смежности узлов графа выделить связную область  $G^*$ , а также множество узлов  $Y = Y_{\text{ПВО}} \cup Y_{\text{РЭП}} = G \setminus G^*$ , которые в результате учета воздействия факторов ПВО и РЭП утратили связность с областью  $G^*$ .

Особенностью алгоритма иерархической кластеризации Ланса-Вильямса является объединение объектов по заданному критерию «снизу-вверх». То есть каждый узел помещается в свой отдельный кластер. Отдельные кластеры объединяются при выполнении критерия кластеризации в слитные кластеры. Предлагается применить данный алгоритм к связному графу  $G^*$  и провести кластеризацию узлов, для которых выполняется условие  $P_{пор\ u} \geq P_{пор}^{крит}$  и  $P_{под\ u} \geq P_{под}^{крит}$ . Это позволит сформировать в составе области  $G^*$  множество автономных областей  $R_{ПВО}$  и  $R_{РЭП}$ , которые подвергаются воздействию средств ПВО и РЭП соответственно. В качестве показателя кластеризации выбирается метрика  $M$ . При формировании множества  $R_{ПВО}$  под метрикой будем понимать вероятность поражения БЛА средствами ПВО  $M_u = P_{пор\ u}$ , а при формировании множества  $R_{РЭП}$  – вероятность подавления КРУ БЛА средствами РЭП  $M_u = P_{под\ u}$ .

Схема методики формирования полетных зон БЛА по степени устойчивости управления представлена на рис. 3. Рассмотрим ее основные этапы.

В начале методики инициализируются исходные данные, необходимые для проверки связности графа сети  $G$ , и формирования связной области  $G^*$  (блок 1 на рис. 3). На первом прогоне формируются кластеры, соответствующие зонам ПВО, при этом  $t=1$ , а в качестве метрики  $M_1$  узлов, в этом случае, принимается вероятность поражения БЛА средствами ПВО  $P_{пор\ u}$ , а в качестве критического значения метрики  $M_{крит\ 1}$  выбирается критическое значение вероятности поражения БЛА  $P_{пор}^{крит}$  (блок 2 на рис. 3).

На первом этапе прогона методики необходимо проверить связность текущего графа  $G$  геотопологической модели, т.е. определить, нет ли областей, которые в результате учета фактора ПВО, оказываются недоступными для БЛА. Для определения связности области  $G$  используется известный метод определения сильносвязных областей [25]. При использовании данного метода для всех узлов  $u_i, i=1..n$  в составе графа  $G$  сначала ведется поиск путей в глубину до всех других узлов  $u_j, j=1..n, i \neq j$  с целью определения количества шагов  $s(u_i, u_j)$  от  $u_i$  до  $u_j$  (цикл из блоков 3-6 на рис. 3). При этом считается, что шаг для достижения следующей вершины возможен ( $s(u_i, u_{i+1})=1$ ) если метрика пути на данном шаге менее критического значения ( $M(u_i, u_{i+1}) < P_{пор}^{крит}$ ), то есть путь со значением вероятности  $P_{пор} < P_{пор}^{крит}$  между  $u_i$  и  $u_{i+1}$  существует. После этого ведется расчет количества шагов в обратных путях  $s^T(u_i, u_j)$  тем же способом, но с использованием транспонированной матрицы связности  $G^T$  (блоки 7-11 на рис. 3). Вершины  $u_i, u_j$ , между которыми имеются пути из счетного количества шагов в прямом или обратном направлении, добавляются в качестве элементов связного графа  $G^*$  (блоки 6, 11 на рис. 3). Из тех узлов графа  $G$ , которые не вошли в множество связных вершин  $G^*$ , образуется множество узлов  $Y_t$ , утративших связность вследствие воздействия  $t$ -го типа (блок 12 на рис. 3):  $Y_t = G \setminus G^*$ .

Второй этап прогона ориентирован на формирование кластеров. Для данного этапа инициализируются следующие исходные данные. Каждый узел помещается в собственный отдельный кластер (блок 13 на рис. 3). Инициализируется пустое начальное множество  $R_t = \{\circ\}$ , содержащее кластеры, подвергшиеся воздействию  $t$ -го типа. Задается критериальное значение воздействия  $t$ -го типа в виде показателя  $M_{крит\ 1}$  (блок 16 на рис. 3).



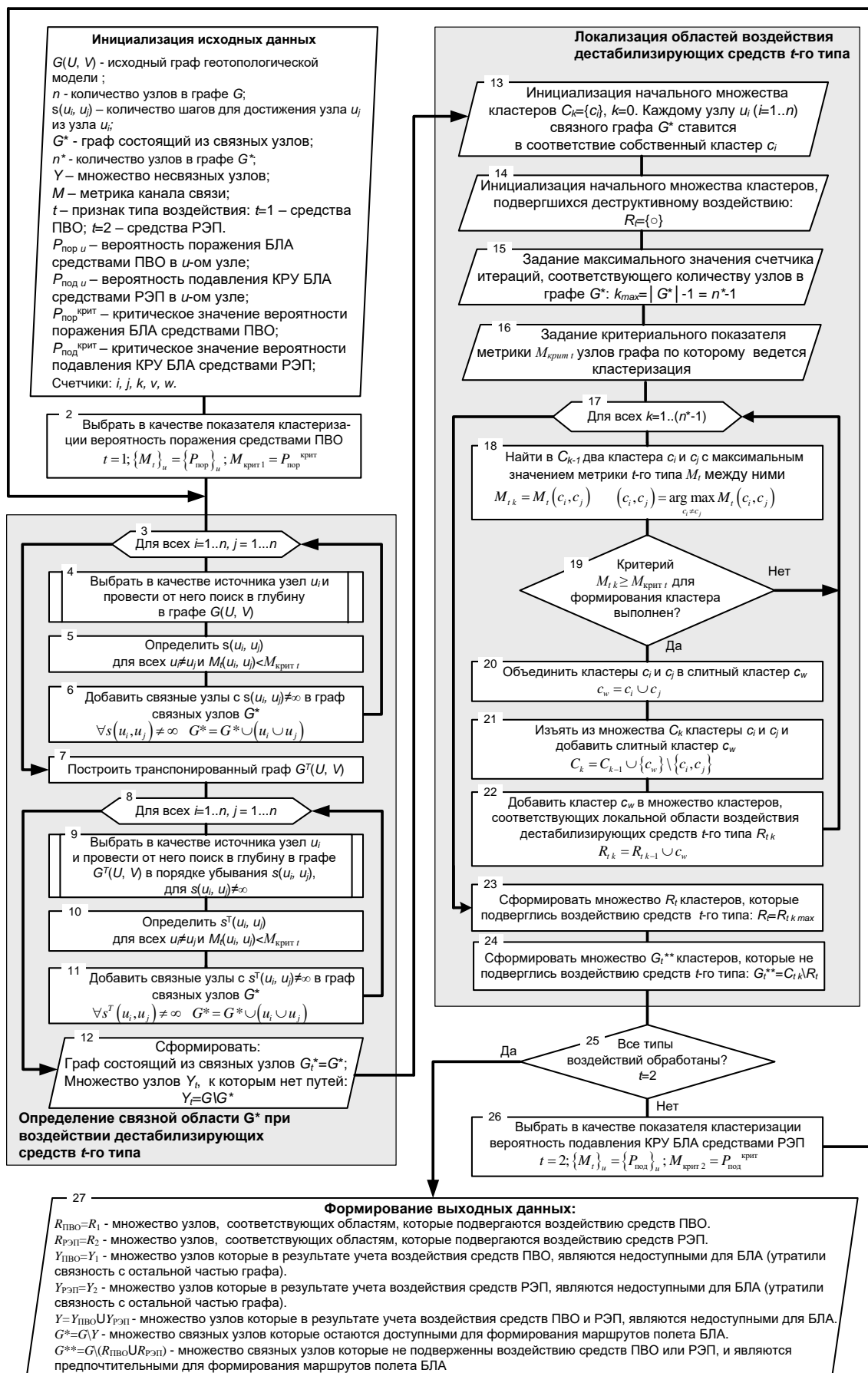


Рис. 3. Схема методики формирования полетных зон БЛА

Процесс формирования областей, которые подверглись воздействию  $t$ -го типа, состоит в следующем. С учетом того, что при инициализации каждый узел был помещен в отдельный кластер, формирование областей воздействия состоит в объединении узлов, находящихся в кластерах  $c_i$  и  $c_j$ , с наибольшими значениями метрики  $M(c_i)$  и  $M(c_j)$ . При этом значения  $M(c_i)$  и  $M(c_j)$  должны превышать критическое значение  $M_{\text{крит } t}$  (блоки 17-22 на рис. 3). Это приводит к тому, что начав с узла с наибольшим значением  $M$ , остальные узлы «стягиваются» к нему пока обеспечивается выполнение критерия  $M_{tk} \geq M_{\text{крит } t}$ . Процесс продолжается до тех пор пока не останется узлов, соответствующих критерию  $M_{tk} \geq M_{\text{крит } t}$  (блок 19 на рис. 3). По завершению процесса объединения кластеров множество  $R_t$  будет содержать кластера, соответствующие автономным областям, которые соответствуют воздействию  $t$ -го типа на БЛА. В случае, если критерий  $M_{tk} \geq M_{\text{крит } t}$  для объединения кластеров не будет выполнен, то множество  $R_t$  останется пустым.

После того как завершится прогон для  $t=1$  значению типа воздействия присваивается  $t=2$  и процесс повторяется. При этом для  $t=2$  в качестве метрики узлов  $M_2$  принимается вероятность подавления КРУ БЛА средствами РЭП  $P_{\text{под } u}$ , а в качестве критического значения метрики  $M_{\text{крит } 2}$  выбирается критическое значение вероятности подавления КРУ БЛА  $P_{\text{под}}^{\text{крит}}$  (блок 26 на рис. 3).

На последнем этапе методики формируются следующие выходные данные (блок 27 на рис. 3):

$R_{\text{ПВО}}=R_1$  – множество узлов, соответствующих областям, которые подвергаются воздействию средств ПВО;

$R_{\text{РЭП}}=R_2$  – множество узлов, соответствующих областям, которые подвергаются воздействию средств РЭП;

$Y_{\text{ПВО}}=Y_1$  – множество узлов, которые в результате учета воздействия средств ПВО, являются недоступными для БЛА (утратили связность с остальной частью графа);

$Y_{\text{РЭП}}=Y_2$  – множество узлов, которые в результате учета воздействия средств РЭП, являются недоступными для БЛА (утратили связность с остальной частью графа);

$Y=Y_{\text{ПВО}} \cup Y_{\text{РЭП}}$  – множество узлов, которые в результате учета воздействия средств ПВО и РЭП, являются недоступными для БЛА;

$G^*=G \setminus Y$  – множество связных узлов, которые остаются доступными для формирования маршрутов полета БЛА;

$G^{**}=G^* \setminus (R_{\text{ПВО}} \cup R_{\text{РЭП}})$  – множество связных узлов, которые не подвержены воздействию средств ПВО или РЭП, и являются предпочтительными для формирования маршрутов полета БЛА.

Таким образом, применение данной методики позволяет разложить исходный граф  $G$ , соответствующий геотопологической модели зоны полетов БЛА на ТВД, на связный граф  $G^*$  и изолированные в результате воздействия ДФ множество узлов  $Y_{\text{ПВО}}$  и  $Y_{\text{РЭП}}$ . А связный граф  $G^{**}$  – разложить на области, подвергшиеся воздействию ПВО и РЭП ( $R_{\text{ПВО}}$  и  $R_{\text{РЭП}}$ ), и область  $G^{**}$ , не подвергшуюся воздействию этих средств, и являющуюся предпочтительной для

формирования в ней маршрутов полета БЛА. Пример результата применения данной методики к геотопологической модели на рис. 2 представлен на рис. 4.

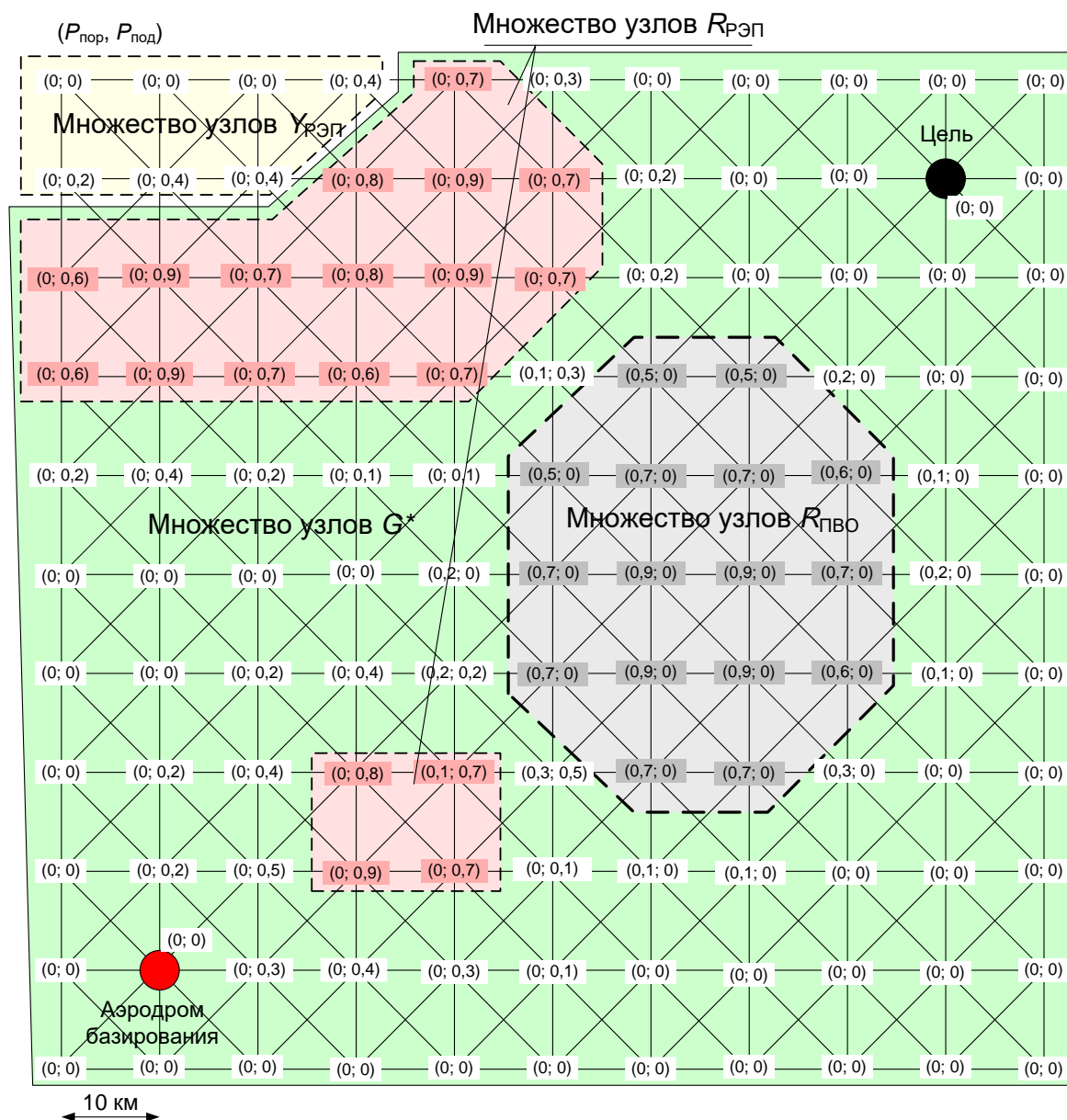


Рис. 4. Пример сформированных множеств  $G^*$ ,  $R_1$ ,  $R_2$  и  $Y_2$  для графа геотопологической модели зоны полетов БЛА на ТВД

### Выводы

Представленное в статье решение позволяет автоматически на основе геотопологической модели зоны полетов БЛА на ТВД и известном местоположении комплексов РЭП и ЗРК ПВО формировать «бесполетные» зоны, в которых высока вероятность поражения БЛА, и зоны нарушения управления вследствие воздействия средств РЭП. Элементами новизны данного решения, отличающее его от известных работ в области формирования маршрутов полетов БЛА [12-17], а также от известных работ в области кластеризации [18-20], является учет в качестве препятствий для полета БЛА двух типов дестабилизирующих воздействий – воздействие средств ПВО и воздействие средств РЭП. Эти

воздействия формализуются в виде интегральной метрики узлов графа геотопологической модели зоны полетов на ТВД. При этом для формирования «бесполетных» зон, в которых высока вероятность поражения БЛА, и зон нарушения управления вследствие воздействия средств РЭП на КРУ БЛА используется математический алгоритм иерархической кластеризации Ланса-Вильямса [28], а проверка связности маршрутной сети основана на методе определения сильно-связных областей графа [29].

### Литература

1. Бабич В. К., Баханов Л. Е., Герасимов Г. П., Гиндранков В. В., Гришин В. К., Горощенко Л. Б., Зинич В. С., Карпеев В. И., Левитин В. Ф., Максимович В. А., Полушкин Ю. Ф., Слатин В. В., Федосов Е. А., Федунев Б. Е., Широков Л. Е. *Авиация ПВО России и научно-технический прогресс: боевые комплексы и системы вчера, сегодня, завтра* / под ред. Е.А. Федосова. Монография. – М.: Дрофа, 2004. – 816 с.
2. Верба В. С., Меркулов В. И. Теоретические и прикладные проблемы разработки систем радиопреуправления нового поколения // *Радиотехника*. 2014. № 5. С. 39-44.
3. Верба В. С., Поливанов С. С. Организация информационного обмена в сетевентрических боевых операциях // *Радиотехника*. 2009. № 8. С. 57-62.
4. Верба В. С. *Авиационные комплексы радиолокационного дозора и наведения. Принципы построения, проблемы разработки и особенности функционирования*. Монография. – М.: Радиотехника, 2014. – 528 с.
5. Меркулов В. И., Харьков В. П. Оптимизация иерархического управления группой БЛА // *Информационно-измерительные и управляющие системы*. 2012. Т. 10. № 8. С. 61-67.
6. Меркулов В. Н., Дрогалин В. В., Канащенков А. Н., Лепин В. Н., Самарин О. Ф., Соловьев А. А. *Авиационные системы радиопреуправления. Том 1. Принципы построения систем радиопреуправления. Основы синтеза и анализа* / Под ред. А.И. Канащенкова и В.И. Меркулова. – М.: Радиотехника, 2003. – 192 с.
7. Макаренко С. И., Иванов М. С. *Сетевентрическая война – принципы, технологии, примеры и перспективы*. Монография. – СПб.: Наукоемкие технологии, 2018. – 898 с.
8. Макаренко С. И. *Информационное противоборство и радиоэлектронная борьба в сетевентрических войнах начала XXI века*. Монография. – СПб.: Наукоемкие технологии, 2017. – 546 с.
9. 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.
10. Казарьян Б. И. *Беспилотные аппараты. Способы применения в составе боевых систем* // *Военная мысль*. 2012. № 3. С. 21-26.
11. 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).

12. 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

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

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

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

16. 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.

17. 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.

18. Макаренко С. И. Обеспечение устойчивости телекоммуникационной сети за счет ее иерархической кластеризации на области маршрутизации // Труды учебных заведений связи. 2018. Т. 4. № 4. С. 54-67. DOI: 10.31854/1813-324X-2018-4-4-54-67

19. Ушанев К. В., Макаренко С. И. Классификация информационных потоков в сети связи для обоснования целесообразности применения к ним способов обеспечения качества обслуживания // Инфокоммуникационные технологии. 2016. Т. 14. № 2. С. 142-152.

20. Макаренко С. И. Локализация областей воздействия дестабилизирующих факторов в сети связи на основе алгоритма иерархической кластеризации Ланса-Вильямса // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. 2014. № 4 (16). С. 70-77.

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

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

23. 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.

24. 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.

25. 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.

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

27. Михайлов Р. Л. Радиоэлектронная борьба в вооруженных силах США: военно-теоретический труд. – СПб.: Научное издание, 2018. – 131 с.

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

29. Виллиамс У. Т., Ланс Д. Н. Методы иерархической классификации // Статистические методы для ЭВМ / Под ред. М.Б. Малютова. – М.: Наука, 1986. – С. 269-301.

### References

1. Babich V. K., Bakhanov L. E., Gerasimov G. P., Gindrankov V. V., Grishin V. K., Goroshchenko L. B., Zinich V. S., Karpeev V. I., Levitin V. F., Maksimovich V. A., Polushkin Iu. F., Slatin V. V., Fedosov E. A., Fedunov B. E., Shirokov L. E. *Aviatsiia PVO Rossii i nauchno-tekhnicheskii progress: boevye komplekсы i sistemy vchera, segodnia, zavtra* [Air defense of Russia and scientific-technical progress: combat systems and system yesterday, today, tomorrow]. Moscow, Drofa Publ., 2004. 816 p. (in Russian).

2. Verba V. S., Merkulov V. I. Heoretical and practical problems of designing next generation of radio guidance systems. *Radiotekhnika*, 2014, no. 5, pp. 39-44 (in Russian).

3. Verba V. S., Polivanov S. S. Organizatsiia informatsionnogo obmena v setetsentricheskikh boevykh operatsiiakh [Organization of information exchange in network-centric combat operations]. *Radiotekhnika*, 2009, no. 8, pp. 57-62 (in Russian).

4. Verba V. S. *Aviatsionnye komplekсы radiolokatsionnogo dozora i navedeniia. Printsipy postroeniia, problemy razrabotki i osobennosti funktsionirovaniia. Monografiia* [Aircraft radar patrol and guidance. Principles, problems of development and peculiarities of functioning. Monograph]. Moscow, Radiotekhnika Publ., 2014. 528 p. (in Russian).

5. Kharkov V. P., Merkulov V. I. Synthesis of an algorithm of hierarchical control of UAVs group. *Journal Information-measuring and Control Systems*, 2012, vol. 10, no. 8, pp. 61-67 (in Russian).

6. Merkulov V. N., Drogalin V. V., Kanashchenkov A. N., Lepin V. N., Samarin O. F., Solov'ev A. A. *Aviatsionnye sistemy radioupravleniia. Tom 1. Printsipy postroeniia sistem radioupravlniia. Osnovy sinteza i analiza* [Aviation

radio system. Volume 1. Principles of systems radioupravlenie. Fundamentals of synthesis and analysis]. Moscow, Radiotekhnika Publ., 2003. 192 p. (in Russian).

7. 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).

8. Makarenko S. I. *Informatsionnoe protivoborstvo i radioelektronnaia borba v setetsentricheskikh voinakh nachala XXI veka. Monografiia* [Information warfare and electronic warfare to network-centric wars of the early XXI century. Monograph]. Saint Petersburg, Naukoemkie Tekhnologii Publ., 2017. 546 p. (in Russian).

9. 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. DOI 10.21685/2307-4205-2017-4-13 (in Russian).

10. Kazarian B. I. Bepilotnye 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).

11. Rostopchin V. V. Udarnye bepilotnye letatel'nye apparaty i protivovozdushnaja oborona – problemy i perspektivy protivostojaniya. [Strike unmanned aerial vehicles and air defense-problems and prospects of confrontation]. *ResearchGate.net* Available at: [https://www.researchgate.net/publication/331772628\\_Udarnye\\_bepilotnye\\_letatelnye\\_apparaty\\_i\\_protivovozdusnaa\\_oborona\\_-\\_problemy\\_i\\_perspektivy\\_protivostojaniya](https://www.researchgate.net/publication/331772628_Udarnye_bepilotnye_letatelnye_apparaty_i_protivovozdusnaa_oborona_-_problemy_i_perspektivy_protivostojaniya) (accessed 20 may 2019).

12. Batraeva I. A., Teterin D.P. Trajer 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).

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

14. 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).

15. 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).

16. 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).

17. 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).

18. Makarenko S. I. Hierarchical Clustering of Telecommunication Network to the Independent Routing Areas for the Purposes to Ensure Stability. *Proceedings of Telecommunication Universities*, 2018, vol. 4, no. 4, pp. 54-67. DOI: 10.31854/1813-324X-2018-4-4-54-67 (in Russian)

19. Ushanev K. V., Makarenko S. I. Classification of telecommunication network information flows to rationale for application of methods for improving quality of service. *Infokommunikacionnye tehnologii*, 2016, vol. 14, no. 2, pp. 142-152. DOI: 10.18469/ikt.2016.14.2.05 (in Russian).

20. Makarenko S. I. Area localization of destabilizing factors influence in communication network on the basis of Lance-Williams algorithm of hierarchical clustering. *Radio and telecommunication systems*, 2014, no. 4, pp. 70-77 (in Russian).

21. Belous R. A., Sizov Ju. G., Skokov A. L. Nekotorye osobennosti PVO v uslovijah 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).

22. Makarenko S. I., Ivanov M. S., Popov S. A. *Pomekhozashchishchennost' sistem sviazi 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).

23. 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 of State Technical University Bulletin*, 2010, vol. 6, no. 11, pp. 108-111 (in Russian).

24. 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).

25. Makarenko S. I., Mikhailov R. L., Novikov E. A. The research of data link layer and network layer parameters of communication channel in the conditons 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).

26. Mikhailov R. L. *Pomekhozashchishchennost' transportnykh setei sviazi spetsial'nogo naznachenii*. 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).

27. Mikhailov R. L. *Radioelektronnaya borba v vooruzhennyh silah SSHA: voenno-teoreticheskij trud* [Electronic warfare in the US armed forces: military-theoretical work]. Saint Petersburg, Naukoemkie tehnologii Publ., 2018, 131 p. (in Russian).

28. Kormen T., Lejzerson Ch., Rivest R. *Algoritmy: postroenie i analiz* [Algorithms: construction and analysis]. Moscow, Center for Continuous Mathematical Education Publ., 2000, 960p.

29. Villiams U. T., Lans D. N. *Metody ierarhicheskoy klassifikacii* [The Methods of Hierarchical Classification]. *Statisticheskie metody dlja JeVM* [Statistical methods for PC], Moscow, Nauka Publ., 1986, pp.269-301 (in Russian).

Статья поступила 10 ноября 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: сети и системы связи; радиоэлектронная борьба; информационное противоборство. E-mail: point\_break@rambler.ru

*Мальшев Владимир Александрович* – доктор технических наук, профессор. Заместитель начальника 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; разработка информационно-измерительных систем; разработка систем безопасной посадки вертолетов. E-mail: vmalyshev@list.ru

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

---

## Unmanned aerial vehicles flight zones formation, based on their control stability degree in air defense and electronic warfare conditions

A. S. Vasilchenko, M. S. Ivanov, V. A. Malyshev

**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 of AD and EW zones based on the methods of clustering theory is proposed in the article. Such 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 two types of destabilizing factors: the AD means and the EW equipment impacts as the UAVs flight obstacles. These factors are formalized in the form of integral metric of graph nodes of the geotopological model of the flight zones in TO. In addition, the mathematical algorithm of hierarchical clustering of Lance-Williams for the «no-fly» zones formation, where the probability of UAV defeat is high, and for «off control» zones, because of the EW means impact is used. The connectivity test of a route network in TO is based on a strongly connected graph regions determining method. **Practical significance of the work.** The method allows to increase the stability of UAVs control at their flights in TO equipped with AD means and EW equipment.

*Keywords: flight route, unmanned aerial vehicle, control stability, geotopological model, theater of operations.*

### 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 Sciences. Senior Lecturer of the Department of Avionics. Military Training and Research Center of the Air Force "Air Force Academy named after Professor N.E. Zhukovsky and Yu. A. Gagarin" (Voronezh). Research interests: networks and communication systems; electronic warfare; information warfare. E-mail: point\_break@rambler.ru

*Vladimir Aleksandrovich Malyshev* – Dr. habil. of Engineering Sciences, Professor. Deputy Head of the Department of Aviation Equipment Operation. Military Training and Research Center of the Air Force "Air Force Academy named after Professor N.E. Zhukovsky and Yu. A. Gagarin" (Voronezh). Research interests: artificial intelligence systems; development of information and measurement systems; development of systems for safe landing of helicopters. E-mail: vamalyshev@list.ru

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