

**Применение программных продуктов для оперативного обнаружения радиолокационных разведывательных средств воздушного и космического базирования при планировании распределения средств комплексного технического контроля**

А.В. Леньшин<sup>1</sup>, Е.В. Кравцов<sup>1</sup>, И.А. Сидоренко<sup>1</sup>, А.А. Нейно<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж)  
394064, г. Воронеж, ул. Старых Большевиков, 54а  
E-mail: andrey-lenshin@yandex.ru

*Представлен математический инструментарий, разработанный для повышения эффективности и оперативности комплексного технического контроля, позволяющий оперативно оценивать разведывательную доступность критически важных объектов и анализировать возможности средств радиолокационной видовой разведки, размещаемых на пилотируемых и беспилотных летательных аппаратах воздушного и космического базирования. Разработанные математические методы и сопутствующие процедуры дают возможность быстро оценивать потенциал средств радиолокационной видовой разведки, оптимально распределять силы и средства комплексного технического контроля между критически важными объектами, прогнозировать потенциальные действия противника.*

*Ключевые слова: радиолокационная видовая разведка, комплексный технический контроль, воздушное и космическое базирование, программное обеспечение, оптимизация распределения ресурсов.*

**The use of software products for the operational assessment of air- and space-based radar reconnaissance assets in planning the allocation of integrated technical control facilities**

A.V. Lenshin<sup>1</sup>, E.V. Kravtsov<sup>1</sup>, I.A. Sidorenko<sup>1</sup>, A.A. Neino<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Military Training and Research Center of the Air Force «Air Force Academy named after Professor N.E. Zhukovsky and Yu.A. Gagarin» (Voronezh)

*The paper presents mathematical tools designed to improve the efficiency and efficiency of integrated technical control, which makes it possible to quickly assess the intelligence availability of critical facilities and analyze the capabilities of radar field reconnaissance equipment deployed on manned and unmanned aerial vehicles and space-based. The developed mathematical methods and related procedures make it possible to quickly assess the potential of radar field reconnaissance, optimally distribute forces and means of integrated technical control between critically important objects, and predict potential enemy actions.*

*Keywords: radar specific reconnaissance, integrated technical control, air and space basing, software, optimization of resource allocation.*

**Введение**

Исследование потенциала иностранных технических разведывательных служб в сфере получения данных о Вооруженных Силах РФ демонстрирует устойчивую динамику к расширению и модернизации их возможностей со стороны ведущих мировых держав [1] и возросшую интенсивность разведывательной активности в отношении России. Внимание зарубежных разведывательных структур к России носит

системный характер и охватывает широкий спектр военно-политических и научно-технических аспектов государственного развития.

Средства радиолокационной видовой разведки (РЛВР) воздушного и космического базирования занимают ключевое место в современных разведывательных системах благодаря своим технологическим преимуществам и используют дециметровые (диапазоны L, S) и сантиметровые волны (диапазоны C, X, Ku). Аппаратура РЛВР интегрируется в различные платформы – от пилотируемых и беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) до космических спутников [2, 3]. Качество и объем информации, получаемой средствами РЛВР (включая детальные изображения местности и расположенных на ней объектов) напрямую влияют на эффективность: применения вооружения; использования высокоточного оружия; задействования средств радиоэлектронного поражения; действий войсковых подразделений в ходе специальных операций [4].

Основными режимами съемки, реализуемыми РЛВР воздушного и космического базирования являются: 1) маршрутная съемка (StripMap); 2) телескопический режим (Spotlight); 3) широкополосный режим (ScanSAR). В связи с возрастающей значимостью РЛВР эти системы становятся приоритетной целью для мер противодействия [4, 5]. Мероприятия, направленные на снижение эффективности сбора разведывательных данных о войсках, военных объектах и вооружении, сопряжены со значительными временными и материальными затратами.

### **Постановка задачи**

При ограниченных финансовых и материальных ресурсах особую актуальность приобретает поиск оптимального баланса в противодействии РЛВР. Необходимо обеспечить: выполнение поставленных задач; минимизацию затрат; достижение максимальной результативности [6, 7]. Таким образом, ключевой задачей становится разработка экономически обоснованных рациональных мер противодействия, позволяющих эффективно нейтрализовать угрозы со стороны РЛВР при рациональном использовании ресурсов. Особую сложность представляет систематическая оценка уровня разведывательной доступности КВО и выработка действенных мер их защиты. Перспективным решением данной проблемы выступает применение математического моделирования. Специализированные алгоритмы позволяют: 1) оперативно оценивать потенциал средств РЛВР; 2) проводить комплексный анализ текущей разведывательной обстановки; 3) прогнозировать наиболее вероятные действия противника [8, 9]. Такой подход создает надежную основу для принятия взвешенных управленческих решений в сфере защиты КВО.

Благодаря использованию математических моделей появляется возможность: а) своевременно выявлять уязвимые места в системе защиты; б) оптимизировать распределение ресурсов для защиты объектов; в) выстраивать многоуровневую систему противодействия разведывательной активности. Используемое программное обеспечение позволяет оперативно и с высокой точностью оценивать степень уязвимости КВО для средств РЛВР. При этом учитываются ландшафтные особенности территории, а ключевые процессы автоматизированы. Однако в силу ограниченности выделенных ресурсов полный охват всех потенциально уязвимых объектов оказывается недостижимым.

В этой связи особую актуальность приобретает разработка и внедрение специализированных алгоритмов, обеспечивающих оптимальное распределение контрольных ресурсов применительно к объектам РЛВР. Подобные алгоритмы способствуют: 1) созданию более совершенных инструментов анализа разведывательной обстановки; 2) снижению рисков, обусловленных разведывательной

активностью РЛВР иностранных государств; 3) повышению эффективности противодействия потенциальным угрозам.

Для результативного противодействия разведывательным операциям необходим комплексный подход, включающий, во-первых, детальный анализ уровня разведдоступности объектов; во-вторых, рациональное задействование имеющихся сил и средств КТК. Именно эти аспекты составят основное направление настоящего исследования. Работа продолжает серию научных изысканий, нацеленных на повышение оперативности и эффективности мер противодействия средствам РЛВР иностранных государств.

Целью настоящей работы заключается в разработке математического аппарата для специализированного программного обеспечения (СПО) средств КТК, обеспечивающего оперативную оценку возможностей РЛВР воздушного и космического базирования (ВКБ) с учетом рационального распределения сил и средств КТК по защищаемым объектам.

### **Результаты исследований**

Иными словами, предстоит создать инструментарий, который позволит в режиме реального времени анализировать потенциал средств РЛВР ВКБ, учитывать текущее размещение и возможности сил и средств КТК, эффективно распределять ресурсы защиты по объектам; оперативно принимать обоснованные решения по противодействию разведывательной деятельности. Математический аппарат призван стать основой алгоритмического обеспечения программных комплексов КТК, существенно повысив их функциональность и практическую ценность в задачах противодействия РЛВР ВКБ.

Средства РЛВР ВКБ являются источником получения обзорных и детальных изображений интересующих объектов и территорий, расположенных в любой точке Земли. К основной характеристике средств РЛВР относят обеспечиваемое пространственное разрешение изображения. Требуемые значения линейного разрешения для типовых объектов приведены в таблице 1 [10].

**Таблица 1 – Требуемое линейное разрешение изображения объекта**

Объекты	Требуемое линейное разрешение изображения, м			
	Обнаружение	Общее распознавание	Точное распознавание	Описание
Средства связи, РЛС	3	1	0,3	0,15
Воинские формирования на стоянке и на марше	6	2	1,2	0,3
Командные пункты	3	1,5	1	0,15
Пусковые установки ОТР, артиллерийские системы	1	0,6	0,15	0,05

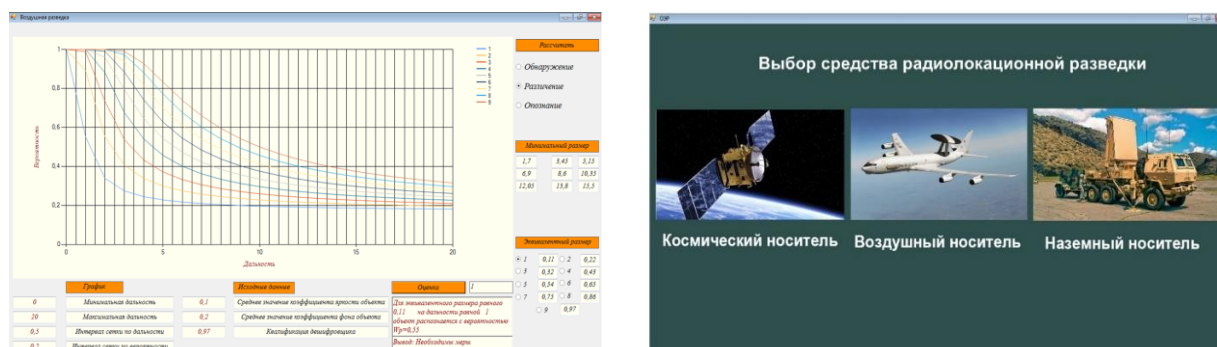
На текущий момент видовая космическая разведка США представлена космическими аппаратами (КА) семейства Lacrosse (радиолокационные). Перспективным тактическим спутником можно считать многоцелевой спутник TacSat-3, представляющий собой экспериментальную реализацию мини спутниковых технологий в рамках программы ORS (Operational Responsive Space) Министерства обороны США. Партнерами по созданию программы являлись военно-морская исследовательская лаборатория (NRL), научно-исследовательская лаборатория BBC (AFRL), Агентство перспективных оборонных исследовательских проектов (DARPA), армейский центр космической и противоракетной обороны, а также Центр космических и ракетных систем BBC США. В качестве интегратора проекта выступила AFRL.

Оборудование, выведенное на орбиту высотой 425 км, спутника TacSat-3 позволяет получать изображения с разрешением 4 м, а также спектральные профили интересующих объектов. РЛВР космического базирования обладает несомненным преимуществом (недостижимость для средств ПВО противника и глобальность разведки). Основные ТТХ КА систем РЛВР приведены в таблице 2 [10].

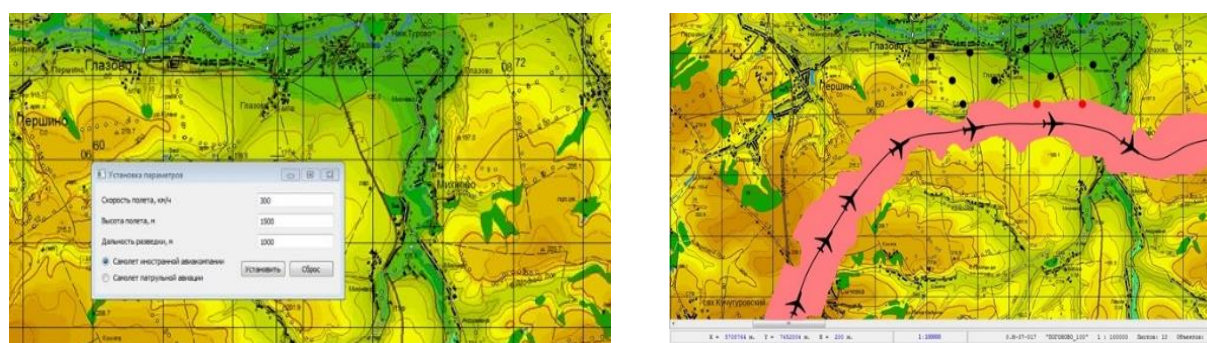
**Таблица 2 – Основные ТТХ КА систем РЛВР**

Наименование КА (государственная принадлежность)	Количество КА в системе	Пространственное разрешение, м	Ширина полосы (по азимуту и по дальности), км
«Lacrosse / Onyx» (США)	2...4	0,3 x 0,3	9 x 18
«SARah» (Германия)	3	0,24 x 0,85	3,7 x 7,5
«CSG» (Италия)	2	0,35 x 0,48	3 x 8

На точность оценок способны существенно влиять ряд ключевых факторов, в частности: время проведения разведывательных мероприятий; наличие естественных и искусственных препятствий для распространения радиолокационных сигналов (рельеф местности, метеорологические условия и др.) [4, 11]. Для учета перечисленных факторов было разработано СПО (рисунок 1), включающее: а) электронные карты местности; б) матрицы высот (рисунок 2).



**Рис. 1. СПО оценки возможностей средств РЛВР ВКБ**



**Рис. 2. Применение электронных карт для оценки возможностей средств РЛВР ВКБ**

Интеграция передовых технологий и математических методов в анализ разведывательной доступности КВО представляет собой важный этап совершенствования системы противодействия РЛВР. Такой подход обеспечивает повышение качества управленческих решений, оперативную адаптацию к изменениям обстановки, а также надежную защиту государственных интересов и объектов

критической инфраструктуры. Методология рационального распределения ресурсов контроля объектов, уязвимых для средств РЛВР, базируется на следующих принципах:

1. Иерархическая структура контролируемых объектов, образующих многоуровневую систему, состоящую из территориально распределенных элементов. Это требует индивидуальной оценки уровня контроля каждого объекта и комплексной оценки охвата всей группы объектов в совокупности [12].

2. Рост сложности идентификации каналов утечки информации. В современных условиях наблюдается существенное увеличение количества вооружения, военной и специальной техники (ВВСТ) средств РЛВР, что создает серьезные затруднения при оперативной идентификации технических каналов утечки данных.

3. Необходимость автоматизации процессов контроля. Для обеспечения требуемого уровня защиты объектов критически важно автоматизировать оценку вероятности обнаружения объектов средствами РЛВР и внедрить автоматизированное планирование применения средств КТК.

Реализация указанных принципов позволит создать эффективную систему противодействия РЛВР ВКБ, обеспечивающую оптимальное использование ресурсов при максимальном уровне защищенности КВО.

Процесс автоматизированного распределения ресурсов КТК включает следующие последовательные шаги:

1. Формирование и актуализация баз данных (БД). Создается и регулярно пополняется информационная база, содержащая: а) технические характеристики средств РЛВР; б) параметры защищаемых объектов (ОЗ); в) данные об условиях проведения разведывательных мероприятий.

2. Использование геоинформационных данных. В расчетных процедурах распределения ресурсов задействуется электронная карта местности, обеспечивающая учет топографических особенностей территории и пространственный анализ зон видимости и радиолокационного покрытия.

3. Автоматизированная оценка разведдоступности. Реализуются алгоритмические методы оперативной оценки степени доступности ОЗ для средств РЛВР, включая моделирование распространения радиолокационных сигналов, а также анализ влияния естественных и искусственных препятствий.

4. Интеграция оценочных результатов. Производится консолидация данных по отдельным средствам КТК, по группировке сил и средств КТК в целом.

Масштаб контролируемых операций определяется совокупностью следующих параметров: 1) количество объектов (число ОЗ, требующих мероприятий КТК); 2) частота запросов на проверку (периодичность инициирования мероприятий КТК); 3) время, необходимое для контроля (длительность процедуры проверки одного) объекта; 4) географическое удаление ОЗ от средств контроля; 5) объем задействованных ресурсов (количество средств КТК и персонала, привлекаемых к контролю); 6) основные характеристики ресурсов (скорость развертывания средств контроля, мобильность и время перемещения между ОЗ).

Указанные параметры формируют многопараметрическое пространство, подлежащее математической формализации для оптимизации процессов распределения ресурсов КТК [12].

#### **Математическая модель системы КТК как многоканальной системы обслуживания.**

Система контроля моделируется в виде многоканальной системы обслуживания с ограничением на среднее время ожидания заявок в очереди. При этом параметр  $n$

обозначает количество доступных средств контроля, а задачи контроля интерпретируются как заявки на обслуживание, поступающие на вход систему.

Основными характеристиками системы являются: 1) поток заявок (простейший характер с заданной интенсивностью поступления); 2) временные параметры (время обслуживания заявки – случайная величина с известным средним значением; время ожидания в очереди – случайная величина с известным средним значением); 3) ограничения по срокам (обязательное условие: объекты должны быть проверены в установленные временные рамки, допускается временная задержка начала контроля при полной занятости средств КТК (модель с ограниченным временем ожидания)).

Величина допустимой задержки  $\bar{t}_{\text{ЗАД}}$  регламентируется следующим условием: задержка  $\bar{t}_{\text{ЗАД}}$  не должна превышать разницу между средним временем обнаружения объектов противником  $t_{\text{СВО}}$  и временем предотвращения нарушения  $t_{\text{ПР}}$  и определяется

$$\bar{t}_{\text{ЗАД}} \leq t_{\text{СВО}} - t_{\text{ПР}} = t_{\text{СВО}} - (t_{\text{НШС}} + t_{\text{ОРГ}}), \quad (1)$$

где  $t_{\text{НШС}}$  – временной интервал обнаружения нештатной ситуации;  $t_{\text{ОРГ}}$  – время, затрачиваемое на подготовку и реализацию мер по устранению нарушения.

Вероятность контроля излучений РЭС можно определить, как

$$W_{\text{РЭС}} = p_{\text{ПО}} \cdot p_{\text{ПА}} \cdot p_{\text{МП}}, \quad (2)$$

где  $p_{\text{ПО}}$  – вероятность обслуживания заявки подсистемой обнаружения средства КТК;  $p_{\text{ПА}}$  – вероятность обслуживания заявки подсистемой анализа;  $p_{\text{МП}}$  – вероятность обслуживания заявки подсистемой определения местоположения, если местоположение контролируемых РЭС известно и пеленгование не производится, то  $p_{\text{МП}} = 1$ .

Таким образом, представленная модель позволяет: 1) формализовать процессы контроля с учетом временных ограничений; 2) оценить вероятность успешного обнаружения и реагирования на угрозы; 3) оптимизировать распределение ресурсов КТК в условиях ограниченной пропускной способности.

Продолжительность этапа обнаружения характеризуется значительной вариативностью – от нескольких десятков минут до нескольких суток. При этом распределение времени выполнения контрольных мероприятий может иметь произвольный характер, распределение времени ожидания заявки в очереди на обслуживание также не регламентировано.

Каждая задача контроля реализуется как последовательность взаимосвязанных этапов:

1. Сбор ресурсов (мобилизация необходимых технических и людских ресурсов).
2. Перемещение средств КТК между зонами мониторинга.
3. Развертывание (подготовка средств КТК к функционированию на новом участке).
4. Непосредственное выполнение контроля (реализация запланированных измерительных и аналитических процедур КТК).

Состав и длительность этапов могут корректироваться в зависимости от динамично изменяющейся оперативной обстановки и специфики объекта контроля [12].

Общее среднее время обслуживания заявки  $t_{\text{ОБС}}$  определяется суммой временных затрат на все этапы

$$t_{\text{ОБС}} = t_{\text{СВ}} + t_{\text{ПЕР}} + t_{\text{РАЗ}} + t_{\text{КОН}}, \quad (3)$$

где  $t_{CB}$ ,  $t_{ПЕР}$ ,  $t_{РАЗ}$ ,  $t_{КОН}$  – среднее время свертывания ресурсов, перемещения между зонами (районами) контроля, развертывания в новой зоне (районе) и выполнения КТК соответственно.

Ключевым показателем эффективности выступает вероятность отказа в обслуживании запроса ( $P_{ОТК}$ ), которая зависит от количества каналов обслуживания ( $n$ ), интенсивности поступления заявок, средней длительности обслуживания. Эффективность СМО оценивается вероятностью отказа в обслуживании запроса  $P_{ОТК}$ , зависящей также от параметров  $\beta = t_{ОБС}/\bar{t}_{ЗАД}$  и  $\alpha = \lambda t_{ОБС}$ . Вероятность связана со степенью охвата контролем соотношением

$$\pi_j = 1 - P_{ОТК}. \quad (4)$$

Представленная модель позволяет количественно оценить временные затраты на выполнение мероприятий КТК, проанализировать влияние структурных параметров СМО на качество обслуживания; оптимизировать распределение ресурсов КТК с учетом допустимого уровня отказов.

### Математическая модель зонального контроля объектов РЛВР

Традиционные модели СМО описывают динамику контроля объектов, однако обладают существенным ограничением: они не учитывают качество контроля применительно к каждому объекту РЛВР. В рамках классических подходов предполагается, что любые нарушения выявляются с абсолютной достоверностью, что на практике не всегда соответствует действительности. Для более точного моделирования предлагается подход, основанный на зональном контроле объектов РЛВР. В этой модели: а) средства РЛВР рассматриваются как элементы СМО; б) процесс обслуживания запроса (фиксация наличия защищаемого объекта – ОЗ – в зоне разведки) разбивается на последовательные этапы. Процесс контроля включает следующие этапы (этапы обслуживания запроса):

1. Обнаружение объекта (выявление наличия объекта в зоне действия средств РЛВР).
2. Классификация объекта (определение типа обнаруженного объекта).
3. Анализ совокупности объектов (оценка взаимосвязей и общей картины по всем обнаруженным объектам).

В зависимости от конкретной оперативно-тактической ситуации и радиоэлектронной обстановки некоторые этапы могут быть пропущены.

Степень охвата контролем определяется как доля проконтролированных ОЗ от их общего количества. Численно этот показатель равен вероятности контроля ОЗ, имеющего демаскирующий признак (ДП). При обнаружении ОЗ в одном из районов разведки подается заявка в подсистему периодического контроля на классификацию выявленного ОЗ. Вероятность обнаружения ОЗ за время его существования определяется выражением ( $T_{ПР}$  – общий период ведения РЛВР)

$$P_{ОБН} = \frac{t_{ОЗ}}{T_{ПР}} [1 - \exp(-T_{ПР}/t_{ОЗ})], \quad (5)$$

где  $t_{ОЗ}$  – средняя продолжительность ведения РЛВР в районе ОЗ;

$$T_{ПР} = \begin{cases} \frac{S_0}{\gamma n} + \frac{S_0 \tau_{АН} \xi}{n} & \text{при свободном поиске ОЗ,} \\ \frac{N}{n} (\tau_{АН} + \tau_{ПЕР}) & \text{при поиске в фиксированном районе,} \end{cases} \quad (6)$$

$S_0$  – общая площадь района РЛВР;  $\gamma$  – скорость разведки минимального района;  $\tau_{\text{АН}}$  – время анализа объекта, необходимое для его обнаружения ( $\tau_{\text{АН}}$  зависит от размера объекта, применения средств маскировки и имитации);  $\xi$  – плотность разведки;  $N$  – количество объектов в районе;  $\tau_{\text{ПР}}$  – время перестройки средств РЛВР [13]. Выражение (6) получено в предположении, что ОЗ, находящиеся в пределах зоны разведки, обнаруживаются достоверно. Это идеализированное предположение упрощает расчеты, но в реальных условиях может требовать корректировки с учетом преднамеренных помех; условий распространения радиоволн; технических ограничений средств РЛВР, действий противника по маскировке и имитации.

Полученные выражения (5), (6) позволяют оценивать вероятность обнаружения ОЗ в зависимости от параметров разведки, анализировать влияние каждого фактора на итоговую эффективность, оптимизировать распределение ресурсов РЛВР (количество приемников, скорость разведки, плотность покрытия), прогнозировать результативность поисковых мероприятий в различных сценариях.

### Модель функционирования подсистемы классификации как СМО

Для оценки вероятности обслуживания заявки подсистемой классификации применим формализацию в виде СМО с ограничением на среднее время ожидания в очереди. Обоснование такого подхода: классификация объектов по заявкам из подсистемы обнаружения может выполняться с определенной задержкой. Величина такой задержки определяется выражением

$$t_{\text{Зад}} \leq t_{\text{изл}} - t_{\text{обн}} - t_{\text{кла}}, \quad (7)$$

где  $t_{\text{обн}} = T_{\text{ПР}}/2$  – среднее время обнаружения ОЗ;  $t_{\text{кла}}$  – время классификации ОЗ, которое для автоматизированных подсистем  $t_{\text{кла}} \approx 2...3$  с, для неавтоматизированных – не менее 100 с.

Если результат расчета по (7) отрицателен, то  $t_{\text{Зад}}$  следует считать равным нулю и использовать для вычисления вероятности обслуживания известную модель СМО с потерями заявок. Интенсивность входного потока заявок подсистемы классификации

$$\lambda_{12} = M/T_{\text{ПР}}, \quad (8)$$

где  $M$  – количество ОЗ, обнаруженных подсистемой обнаружения за время  $T_{\text{ПР}}$ ;

$$M = \begin{cases} \frac{\Phi_0}{K_f} & \text{при свободном поиске ОЗ,} \\ N\rho & \text{при поиске в фиксированном районе,} \end{cases} \quad (9)$$

$K_f$  – коэффициент прореживания объектов (в процессе разведки ряд объектов, не являющихся информативными объектами разведки, исключаются из дальнейшего анализа),  $K_f \approx 2,60...2,85$ ;  $\rho = t_{\text{ОЗ}}/(t_{\text{ОЗ}} + t_{\text{П}})$  – относительное время нахождения ОЗ в районе разведки;  $t_{\text{П}}$  – средняя продолжительность паузы между циклами разведки.

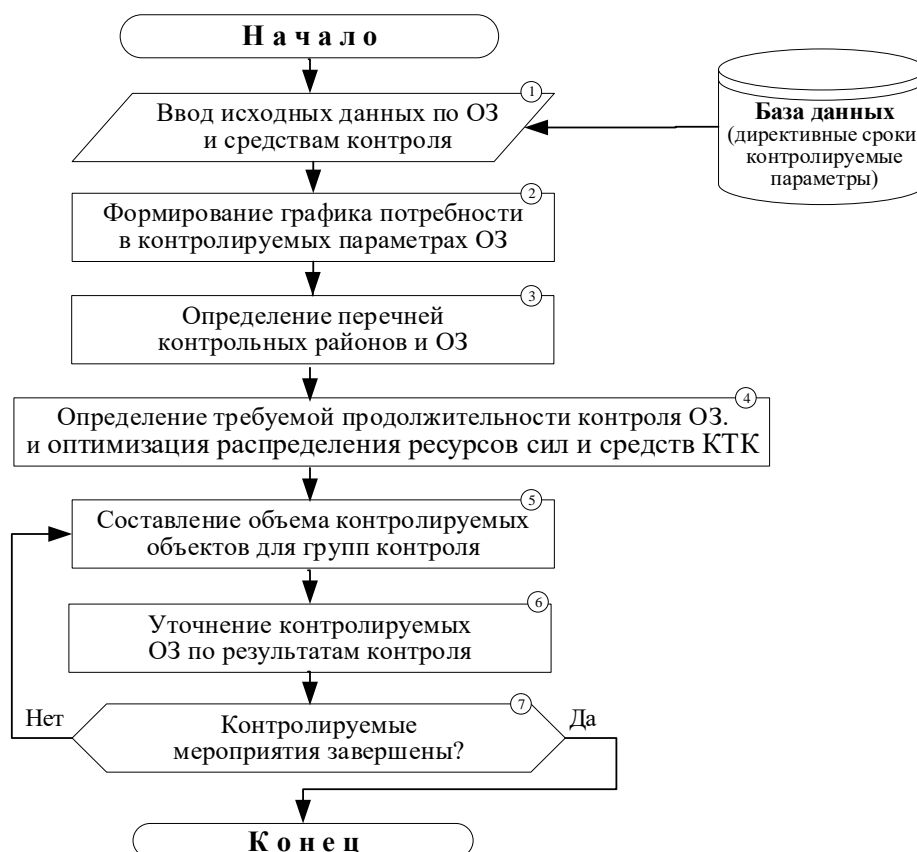
Вероятность отказа в обслуживании заявки  $P_{\text{отк}_2}$  подсистемой классификации зависит от параметров  $\alpha = \lambda_{12}t_{\text{обс}_2}$ ,  $\beta = t_{\text{обс}}/\bar{t}_{\text{ож}}$ ,  $n_2$  ( $n_2$  – количество каналов обслуживания в подсистеме классификации). Вычислив эти параметры, находим  $P_{\text{отк}_2}$  и вероятность обслуживания  $P_{\text{обс}}$ .

Модель функционирования подсистемы классификации позволяет оценить пропускную способность подсистемы классификации, помогает оптимизировать



количество каналов обслуживания, дает инструмент для прогнозирования нагрузки на подсистему в различных сценариях разведки.

**Алгоритм рационального распределения сил и средств контроля по защищаемым объектам.** На основе результатов работ [6–8, 14] и с учетом требуемого времени контроля объектов РЛВР предложен алгоритм оптимального распределения ресурсов (сил и средств КТК), представленный на рисунке 3.



**Рис. 3. Алгоритм определения рационального объема контрольных мероприятий и объектов РЛВР**

Шаг 1 (блок 1). Ввод исходных данных по ОЗ и средствам контроля (наименования элементов РЛВР, подлежащих оценке; данные о средствах имитации; предписанные сроки проведения контрольных мероприятий).

Шаг 2 (блок 2). Формирование графика потребности в контролируемых параметрах. Принимаются во внимание особенности комплектации объекта РЛВР, применяемые методы маскировки и имитации, а также итоги анализа возможностей разведывательных средств РЛВР противника. Исключаются из списка объекты, которые невозможно обнаружить средствами РЛВР, даже при отсутствии мер защиты информации. Все объекты контроля в той или иной степени подвержены обнаружению хотя бы одним средством РЛВР.

Шаг 3 (блок 3). Определение перечней контрольных районов и объектов (формируются списки контрольных районов и входящих в них объектов, которые могут быть проверены каждой группой контроля из определенной позиционной зоны).

Шаг 4 (блок 4). Оценка требуемой длительности контроля объектов и оптимизация распределения ресурсов сил и средств КТК. Блок 4 включает оценку необходимой длительности контроля ОЗ. Требуется определить оптимальное распределение  $N_m$

( $m = \overline{1, M}$ ) каналов обнаружения  $M$  между участками контроля  $L$ . Критериями оптимизации являются:

1. Максимальный охват контроля при минимальных ресурсах – обеспечение требуемого уровня контроля с рациональным использованием сил и средств КТК.

2. Необходимая оперативность – соблюдение установленных сроков проведения контрольных мероприятий.

3. Исключение дублирования контроля – предотвращение повторного контроля одних и тех же участков разными каналами.

4. Соответствие техническим возможностям канала обнаружения – время контроля участков не должно превышать ресурсные ограничения канала обнаружения  $n$  ( $n = \overline{1, N_m}$ ).

5. Зональная принадлежность – контролируемые участки должны находиться в пределах зоны действия соответствующего канала обнаружения.

Реализация разработанного алгоритма позволяет: а) сформировать обоснованный график контрольных мероприятий; б) минимизировать избыточное задействование ресурсов; в) обеспечить своевременность и полноту контроля объектов РЛВР; г) исключить пересечение зон ответственности между группами контроля.

### Математическая постановка задачи оптимального распределения ресурсов сил и средств КТК

Требуется определить матрицу  $X_0 = \|x_{mnl}\|_{M, N_m, L}$ , удовлетворяющую условиям

$$\sum_{m=1}^M \max_{1 \leq n \leq N_m} x_{mnl} \rightarrow \min, \quad 1 \leq l \leq L, \quad (10)$$

$$x_{mnl} = \begin{cases} 1, & \text{если } \Delta f_l \cap \Delta F_{mn} \text{ и } R_{mn} \geq R_0, \\ 0, & \text{в иных случаях,} \end{cases} \quad (11)$$

при линейных ограничениях на переменные

$$\sum_{l=1}^L t_{mnl} x_{mnl} \leq T_{mnl}, \quad (12)$$

$$\sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^{N_m} x_{mnl} \leq 1, \quad (13)$$

а также при условии

$$t_{mnl} \leq t_l, \quad (14)$$

где  $R_{ms}$  – радиусы зон контроля  $m$ -х ОЗ  $s$ -ми средствами КТК, при которых обеспечивается вероятность энергетического обнаружения излучений  $P_{\text{обн}} \geq 0,9$ ;  $t_{mnl}$  – времена просмотра  $m$ -м средством контроля по  $n$ -му каналу  $l$ -го участка;  $t_l$  – требуемая оперативность контроля  $l$ -го участка контролируемого района.

Матрица  $X_0 = \|x_{mnl}\|_{M, N_m, L}$  в конечном итоге максимизирует эффективность контроля, обеспечивает надежное обнаружение объектов в заданных зонах при соблюдении временных и ресурсных ограничений.

Математическая задача рационального распределения ресурсов контроля относится к классу задач нелинейного целочисленного программирования, суть которой – оптимально распределить ресурсы КТК с учетом приоритетности участков, объектов и ограничений по оперативности. Участок признается более приоритетным по сравнению с другим, если одновременно выполняются следующие условия: 1) ОЗ в его пределах доступны для меньшего числа средств контроля; 2) важность находящихся на участке

ОЗ ниже; 3) требуемая оперативность контроля участка выше. Формальные условия приоритетности задаются соотношениями:

$$\sum_{m=1}^M \sum_{s=1}^S a_{ms} \delta_{ls} \prec \sum_{m=1}^M \sum_{s=1}^S a_{ms} \delta_{(l+1)s}, \quad t_l \succ t_{l+1}, \quad (15)$$

$$a_{ms} = \begin{cases} 1, & \text{если } R_{ms} \geq R_0, \\ 0, & \text{если } R_{ms} < R_0, \end{cases} \quad (16)$$

$$\delta_{ls} = \begin{cases} 1, & \text{если } \Delta l_l \cap \Delta L_s \neq \emptyset, \\ 0, & \text{если } \Delta l_l \cap \Delta L_s = \emptyset. \end{cases} \quad (17)$$

Участок контролируемого района считается выбранным, если суммарное время контроля данного участка и всех более приоритетных контролируемых участков не превышает минимального значения требуемой оперативности их контроля

$$\sum_{l_0=1}^{L_0} t_{mnl_0} + t_{mnl} \leq \min_{1 \leq l_0 \leq L_0} \{t_{l_0}, t_l\}, \quad (18)$$

где  $L_0$  – число контролируемых участков с приоритетом выше, чем у  $L$ -го участка ( $L_0 \leq L-1$ ).

В качестве оптимизируемого показателя используется относительная суммарная «степень охвата» объектов и их контролируемых ДП с учетом относительной важности ОЗ и информативности контролируемых параметров (ДП) в основных физических полях

$$\Phi(U, T_a) = \sum_{i=1}^N \beta_i \sum_{j=1}^J \sum_{l=1}^L \delta_{ijl}^{\gamma_{ij}}(T_a, U) \alpha_{ij}. \quad (19)$$

Оптимизация проводится при соблюдении следующих ограничений:

$$\sum_{j=1}^J a_{ij} = 1 \text{ для } \forall i = \overline{1, N}, \quad (20)$$

$$\sum_{l=1}^L \delta_{ijl}^{\gamma_{ij}} \leq 1 \text{ для } \forall t \in [0, T_a], \quad i = \overline{1, N}, \quad j = \overline{1, J}, \quad (21)$$

где  $\beta_i$  – степень важности  $i$ -го ОЗ [16];  $\{\gamma_{ij}\}$  – множество задач контроля для каждого  $i$ -го объекта в каждом  $j$ -м районе;  $\delta_{ijl}^{\gamma_{ij}}(T_a, U)$  – показатель степени выполнения задач контроля за анализируемый период времени  $[0, T_a]$ ;  $U$  – план-график применения сил и средств КТК, описываемый параметрами  $T_k$ ,  $\Delta \tau_k$ ,  $L_k$ .

### Моделирование процесса контроля как системы массового обслуживания

Показатель степени выполнения задач контроля  $\delta_{ijl}^{\gamma_{ij}}$  для любого  $t \in [0; T_a]$  может быть формализован посредством СМО, определяющую различные режимы обслуживания объектов (контроль заданного диапазона частот). Типы режимов обслуживания, характеризующиеся особым характером входных потоков:

1. Режим с детерминированными входными потоками – режим  $q=1$  (заданы фиксированные моменты начала и окончания интервалов контроля; требуется непрерывное ведение контроля в установленные временные рамки).

2. Режим со случайными входными потоками – режим  $q=2$  (потоки требований носят стохастический характер; известны средние значения периодичности контроля и продолжительности интервалов контроля).

3. Режим с директивными сроками контроля – режим  $q = 3$  (временные интервалы определяются жесткими директивными требованиями, потоки носят детерминированный характер, ориентированный на соблюдение установленных сроков).

Для каждой из зон контроля и каждого варианта решения задач контроля  $\delta_{ijl}^{\gamma ij}(T_a, U)$  различными средствами КТК рассчитывается достигаемая степень охвата контролем объектов и задач контроля в заданных районах контроля

$$\delta_{ijl}^{\gamma ij} = \begin{cases} 1 \text{ для } q = 1, 3 \text{ если на } i\text{-ом объекте в } j\text{-ом диапазоне частот} \\ \text{для } l\text{-го средства КТК выполняется условие } [t_{ijl}^{H\gamma ij}, t_{ijl}^{K\gamma ij}] \in [t_{ij}^{H\gamma ij}, t_{ij}^{K\gamma ij}], \\ 0 \text{ для } q = 1, 3 \text{ в противном случае,} \\ \text{для } q = 1 \quad [t_{ijl}^{H\gamma ij}, t_{ijl}^{K\gamma ij}] \cap [t_{ij}^{H\gamma ij}, t_{ij}^{K\gamma ij}] \leq v_{ijl}^{\min \gamma ij}, \\ \text{для } q = 3 \quad t_{ij}^{H\gamma ij} \geq t_{ijl}^{H\gamma ij}, t_{ijl}^{K\gamma ij} > t_{ij}^{K\gamma ij}, \\ \Delta t_{ijl}^{\gamma ij} / (t_{ij}^{K\gamma ij} - t_{ij}^{H\gamma ij}) \text{ для } q = 1 \text{ при } [t_{ijl}^{H\gamma ij}, t_{ijl}^{K\gamma ij}] \cap [t_{ij}^{H\gamma ij}, t_{ij}^{K\gamma ij}] \geq v_{ijl}^{\min \gamma ij}, \\ 1 - [1 - \mu_{ij}^{\gamma ij} \tau_{ij}^{\gamma ij} \exp(-v_{ijl}^{\min \gamma ij} / \theta_{ijl}^{\gamma ij})] \exp((\Delta t_{ijl}^{\gamma ij} - v_{ijl}^{\min \gamma ij}) / \theta_{ijl}^{\gamma ij}) \\ \text{для } q = 2 \text{ и } \Delta t_{ijl}^{\gamma ij} \geq v_{ijl}^{\min \gamma ij}, \end{cases} \quad (22)$$

где  $t_{ij}^{H\gamma ij}$ ,  $t_{ij}^{K\gamma ij}$  – моменты начала и окончания интервала решения  $\gamma ij$ -ой задачи (заданного требования на проведение КТК  $i$ -го ОЗ в  $j$ -м диапазоне частот (длин волн));  $t_{ijl}^{H\gamma ij}$ ,  $t_{ijl}^{K\gamma ij}$  – моменты начала и окончания интервала применения  $l$ -го средства КТК для решения  $\gamma ij$ -ой задачи КТК;  $v_{ijl}^{\min \gamma ij}$  – минимально необходимое нормативное время решения  $\gamma ij$ -ой задачи контроля  $l$ -м средством КТК;  $\tau_{ij}^{\gamma ij}$ ,  $\mu_{ij}^{\gamma ij}$ ,  $\theta_{ijl}^{\gamma ij}$  – средняя продолжительность, периодичность и пауза потоков требований по решению  $\gamma ij$ -ой задачи контроля соответственно;  $\Delta t_{ijl}^{\gamma ij}$  – временной интервал, в котором осуществляется применение  $l$ -го средства КТК для решения  $\gamma ij$ -ой задачи КТК.

Представленный подход позволяет формализовать разнородные режимы контроля в рамках единой модели СМО, количественно оценивать эффективность выполнения задач контроля в динамике, сравнивать варианты распределения сил и средств КТК по зонам и задачам, оптимизировать расписание применения средств КТК с учетом директивных сроков и стохастических факторов.

### **Ранжирование вариантов контроля и автоматизация планирования ресурсов**

На основании рассчитанных значений степени охвата контролем выполняется ранжирование альтернативных вариантов решения контрольных задач. Процедура предусматривает:

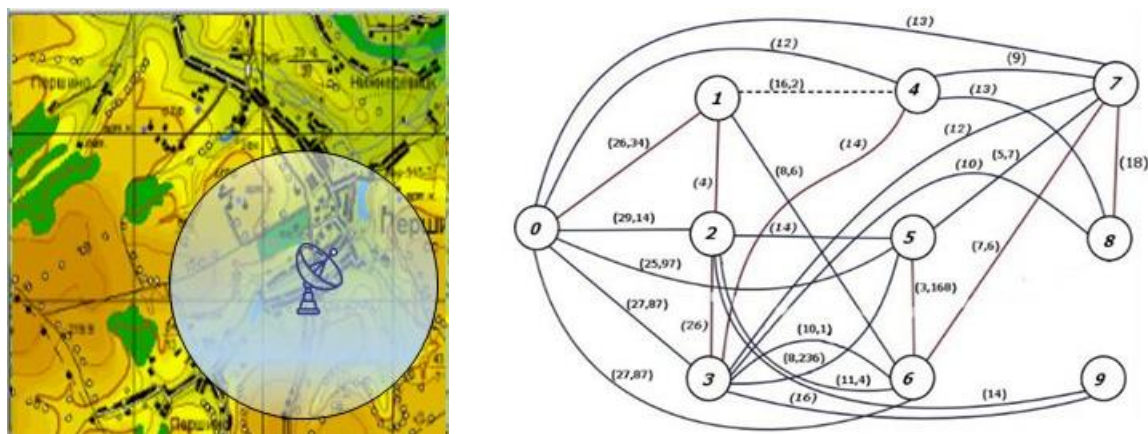
1. Сравнительный анализ эффективности применения различных типов средств КТК в каждой зоне контроля.
2. Упорядочивание вариантов по критерию достигаемой степени охвата – от наиболее эффективных к менее предпочтительным.
3. Выявление оптимальных решений, обеспечивающих максимальный охват контролируемых объектов, соблюдение нормативных требований по времени контроля, рациональное использование ресурсов.

Автоматизация процесса планирования применения сил и средств КТК осуществляется с помощью разработанного математического обеспечения, реализующего следующие функции: 1) формализованный расчет показателей

эффективности КТК; 2) многокритериальную оценку альтернативных вариантов; 3) оптимизацию распределения ресурсов КТК по ОЗ; 4) генерацию плановых решений с учетом пространственно-временных ограничений, технических характеристик средств КТК и приоритетности контролируемых объектов и задач.

Практическое применение предложенной методологии обеспечено созданием специализированного программного обеспечения (ПО), которое визуализирует зоны контроля и распределение ресурсов КТК, автоматизирует расчеты показателей охвата, формирует ранжированные списки оптимальных решений и предоставляет возможности для корректировки входных параметров.

Примеры реализации ПО и функциональных возможностей разработанного ПО представлены на рисунке 4.



**Рис. 4. Специальное программное обеспечение для распределения средств контроля**

Использование специального ПО, реализующего математическую модель зонального контроля объектов РЛВР для распределения средств КТК, обеспечивает:

- повышение объективности принимаемых решений за счет своевременного и точного анализа разведывательной обстановки;
- учитывать качество контроля на уровне отдельных объектов;
- оценивать влияние ошибок обнаружения и классификации на общий результат,
- сокращение времени на планирование контрольных мероприятий, прогнозирование требуемой продолжительности мониторинга;
- максимально корректно моделировать условия распространения радиолокационных сигналов, учитывать влияние топографических и метеорологических особенностей территории;
- увеличение эффективности использования средств КТК за счет оптимального распределения ресурсов.

### **Вывод**

Таким образом, в работе разработан комплексный математический инструментарий, позволяющий оперативно оценивать возможности РЛВР и оптимально распределять силы и средства КТК по защищаемым объектам (ОЗ). Ключевыми особенностями инструментария являются: 1) учет разнородных требований к выполнению задач КТК по диапазонам контролируемых частот и по временным интервалам, в которых необходим контроль ОЗ; 2) оптимизационная составляющая (определение целесообразных районов ведения контроля для каждой группировки ОЗ, балансировка ресурсов с учетом пространственно-временных ограничений). Функциональные возможности инструментария позволяют:

- рассчитать процент охваченных контролем объектов от их общего числа, получить объективную оценку полноты выполнения контрольных мероприятий;
- спрогнозировать требуемую длительность мониторинга (планирование временных ресурсов с учетом нормативных требований);
- эффективно распределить имеющиеся средства КТК, минимизировать избыточное задействование ресурсов при сохранении требуемого уровня контроля.

Практическая значимость разработанного инструментария обеспечивает повышение объективности решений за счет математически обоснованных критериев оптимизации, сокращение времени на планирование (автоматизация рутинных расчетов и генерации планов), увеличение эффективности контроля, а также адаптивность к изменяющимся условиям (возможность пересчета планов при корректировке входных параметров, например, при изменении приоритетов ОЗ или появлении новых средств РЛВР). Предложенный подход сочетает строгую математическую основу с практической ориентированностью, что делает его пригодным для внедрения в системы оперативного управления контролем ОЗ.

### Литература

1. Бражников А.Е., Меньшаков Ю.К. Иностранные разведки. Сегодня. – М.: Медиа Группа «Авангард», 2015. – 458 с.
2. Левшонков Н.В., Нафиков И.М., Митряйкин В.И. Обеспечение проведения мониторинга с применением беспилотных авиационных систем // Известия высших учебных заведений. Авиационная техника. – 2024. – № 4. – С. 150–155.
3. Васильев В.А., Федюнин П.А., Манин В.А., Васильев А.В. Концептуальная оценка разведывательного обеспечения ударных действий авиации // Воздушно-космические силы. Теория и практика. – 2020. – № 14. – С. 41–54.
4. Купряшкин И.Ф., Лихачев В.П. Космическая радиолокационная съемка земной поверхности в условиях помех: монография. – Воронеж: Научная книга, 2014. – 460 с.
5. Леньшин А.В., Кравцов Е.В., Сидоренко И.А. Применение математического обеспечения системы оперативной оценки возможностей радиолокационной видовой разведки при распределении средств контроля // Всероссийские открытые Арmandовские чтения [Электронный ресурс]: Современные проблемы дистанционного зондирования, радиолокации, распространения и дифракции волн / Материалы Всероссийской открытой НК. – Муром: МИ ВлГУ, 2025. – С. 239–247.
6. Леньшин А.В., Кравцов Е.В. Методика адаптивного распределения сил и средств комплексного технического контроля по объектам защиты в различных физических полях разнесенного приема // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. – 2020. – № 4. – С. 15–22.
7. Берзин Е.А. Оптимальное распределение ресурсов и элементы синтеза систем / Под ред. Е.В. Золотова. – М: Радио и связь, 1974. – 304 с.
8. Леньшин А.В., Кравцов Е.В., Сидоренко И.А. Математический аппарат оперативной оценки возможностей радио- и радиотехнической разведки в лесном массиве // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. – 2023. – № 4. – С. 72–78.
9. Леньшин А.В., Кравцов Е.В., Сидоренко И.А. Особенности оперативной оценки радиолокационной видовой заметности объектов комплексного технического контроля // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. – 2025. – № 1. – С. 5–12.
10. Васильев В.А., Федюнин П.А., Беляев М.П., Манин В.А. Анализ возможностей космической разведки по информационному обеспечению управления авиацией при выполнении огневых задач // Воздушно-космические силы. Теория и практика. – 2021. – № 17. – С. 47–56.
11. Купряшкин И.Ф., Лихачев В.П., Рязанцев Л.Б. Малогабаритные РЛС с

непрерывным частотно-модулированным излучением. Монография. – М.: Радиотехника, 2020. – 280 с.

12. Леньшин А.В., Кравцов Е.В. Методика определения частоты и продолжительности контроля эффективности защиты информации на критически важных объектах // Телекоммуникации. – 2021. – № 5. – С. 30–34.

13. Теоретические и физические основы радиолокации и специального мониторинга: учебник / А.Н. Фомин, В.Н. Тяпкин, Д.Д. Дмитриев и др.; под общ. ред. И.Н. Ищука. – Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2016. – 292 с.

14. Леньшин А.В., Кравцов Е.В. Метод рационального распределения разнородного ресурса радиоэлектронной системы защиты охраняемых сведений объектов комплексного технического контроля // Телекоммуникации. – 2021. – № 12. – С. 31–38.