

DOI 10.24412/2221-2574-2023-4-72-78

УДК 623.624

МАТЕМАТИЧЕСКИЙ АППАРАТ ОПЕРАТИВНОЙ ОЦЕНКИ ВОЗМОЖНОСТЕЙ РАДИО- И РАДИОТЕХНИЧЕСКОЙ РАЗВЕДКИ В ЛЕСНОМ МАССИВЕ

Леньшин Андрей Валентинович

доктор технических наук, профессор, профессор 101 кафедры авиационных радиоэлектронных комплексов, Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина».

E-mail: andrey-lenshin@yandex.ru

Кравцов Евгений Владимирович

доктор технических наук, доцент, начальник 54 кафедры противодействия техническим средствам разведки, Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина».

E-mail: evgenijkravtsov@mail.ru

Сидоренко Иван Андреевич

адъюнкт 54 кафедры противодействия техническим средствам разведки, Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина».

E-mail: Ivan.Sidorenko.95@yandex.ru

Адрес: 394064, Российская Федерация, г. Воронеж, ул. Старых Большевиков, д. 54А.

Аннотация: Предложен математический аппарат оперативной оценки возможностей радио- и радиотехнической разведки, проводимой вблизи или внутри лесных массивов, позволяющий повысить достоверность проведения оперативной оценки возможностей радио- и радиотехнической разведки объектов защиты комплексного технического контроля.

Ключевые слова: вероятность обнаружения, радиоразведка, радиотехническая разведка, оперативная оценка, множитель ослабления, лесной массив.

Проведение мероприятий комплексного технического контроля (КТК) на современном этапе развития характеризуется стремительным увеличением как технических средств разведки (ТСР) иностранных государств, так и радиоэлектронных средств (РЭС) — объектов защиты (ОЗ), демаскирующие признаки которых проявляются во всех физических полях. Одним из наиболее опасных видов разведки является радио- и радиотехническая разведка (РРТР) на различных средствах базирования [1]. Массово применяются средства РРТР на самолетах авиакомпаний иностранных государств, совершающих воздушные перелеты над территорией Российской Федерации и в приграничных районах. Анализ современного состояния и перспектив развития средств РРТР позволяет сформулировать задачи, которые могут решаться этими средствами в процессе

проведения разведывательных мероприятий. РРТР осуществляется путём радиоперехвата сообщения и пеленгования радиостанций в линиях и сетях УКВ-, КВ-, СВ-, ДВ-диапазонов, тропосферной и радиорелейной связи; перехвата и пеленгования сигнала бортовых и наземных радиолокационных средств, телеметрической аппаратуры. Средства РРТР широко используются также при ведении разведки побочных электромагнитных излучений и наводок [2].

С учётом широкой номенклатуры средств разведки и объектов защиты стремительно повышается актуальность совершенствования методического и математического аппарата оценки как возможностей средств РРТР, так и оценки разведдоступности ОЗ.

В работе [3] предложен методический аппарат оценки возможностей современных

средств РРТР и получены зависимости, характеризующие возможности средств РРТР различного базирования, позволяющие оценивать разведдоступность ОЗ. В работе [4] представлен алгоритм рационального распределения разнородных комплексов и средств КТК по объектам контроля и защиты в условиях ограниченного ресурса сил, средств и времени при реализации оперативных действий (по отдельным задачам КТК) по защите критически важных объектов.

Методика адаптивного распределения разнородных средств КТК по ОЗ в условиях ограниченного ресурса сил, средств и времени при планировании мероприятий по противодействию ТСР предложена в работе [5]. Методика адаптивной настройки параметров алгоритма рационального распределения комплексов и средств КТК по ОЗ в различных физических полях, основанная на оптимизации системы КТК при независимых элементах системы за счёт использования метода весовых коэффициентов, в условиях ограниченного ресурса сил и времени при планировании мероприятий по противодействию техническим средствам разведки предложена в работе [6]. Метод оперативной оценки возможностей средств разведки, базирующийся на типизации и обобщении исходных данных, определяющих характеристики средств разведки, ОЗ и условия ведения разведки, позволяющий определять функциональные зависимости показателей защищенности ОЗ от дальности ведения разведки в условиях неполноты и неопределенности исходных данных обоснован в работе [7].

В работах [8, 9] рассмотрена методика оценки возможностей РРТР, однако данный математический аппарат не учитывает возможные препятствия на трассе, такие как лесной массив и кустарники, которые могут существенно повлиять на результаты оперативной оценки.

Целью данной работы является разработка и обоснование математического аппарата для повышения достоверности получаемой оценки возможностей средств РРТР за счёт учёта

наличия лесного массива на трассе при размещении РЭС вблизи или внутри лесного массива.

Реализация любого математического аппарата оценки предполагает определение параметра оценки, наличие методики и рекомендаций по проводимой оценке. Основными показателями для оценки РРТР являются вероятность обнаружения W_O и вероятность распознавания W_P , а также характеристики точности измерения параметров сигналов. Характеристикой условий ведения разведки в данном случае выступает дальность ведения разведки. На практике важнейшей задачей является определение вероятности обнаружения W_O , особенно в условиях высокой динамичности оперативной обстановки и перемещений ОЗ, что требует прямой связи с дальностью D_P (зоной действия средств РРТР или ОЗ).

Проведённый анализ показывает, что применительно к средствам РРТР указанные выше требования могут быть реализованы, если в качестве обобщённой оценки принять функциональную зависимость указанных вероятностей и дальности в виде

$$W_{O(P)} = f(D_P). \quad (1)$$

Проведённый в работе [9] анализ показывает, что кроме дальности необходимо также учитывать и время излучения ОЗ, то есть рассчитывать функциональную зависимость (1) с учётом временного фактора

$$W_{O(P)} = f(D_P, t), \quad (2)$$

где t — время излучения ОЗ.

Воспользуемся приведённой в работе [1] зависимостью вероятности обнаружения от времени в виде

$$W_O(t) = 1 - \exp \left[-\frac{t}{T_H} \cdot \ln \left(1 + \frac{P_{CBX}}{\gamma \cdot (P_{III} + P_{II})} \right) \right], \quad (3)$$

где T_H — минимальная длительность работы на излучение; P_{CBX} — мощность сигнала на входе приёмника средства РРТР; P_{III} — мощность шума на входе приёмника; P_{II} — мощ-

ность помехи на входе приёмника; $\gamma \geq 1$ — коэффициент различимости, определяемый средним показателем качества обнаружения. При первоначальной оценке вероятности обнаружения РЭС средствами РРТР примем усреднённое значение, равное трём ($\gamma = 3$).

Подставим в общее выражение зависимости вероятности обнаружения от времени (3) полученные в [9] соотношения и получим

$$W_o(t, D_p) \approx 1 - \exp \left[- \frac{c^2 \cdot P_3 \cdot 10^{0,1 \cdot R(f_c)} \eta}{(4\pi)^2 \cdot f_c^2 \cdot 10^{0,1 \cdot N_{\min}(f_c)} \cdot \gamma \cdot B} \cdot V \cdot \frac{t}{D_p^2} \right], \quad (4)$$

где P_3 — эквивалентная (излучаемая) мощность источника радиоизлучения (ИРИ); $R(f_c)$ — значение коэффициента усиления антенны на частоте сигнала f_c , [дБ]; η — коэффициент потерь в приёмном тракте с учётом несовпадения поляризаций антенны средства РРТР и сигнала (при проведении оперативной оценки целесообразно установить значение $\eta = 0,25$); $N_{\min}(f_c)$ — чувствительность приёмника, выражается в дБ относительно 1 Вт, измеренная в полосе частот 1 Гц [дБ/Вт/Гц]; B — коэффициент, определяющий длительность сигнала РЭС, $B = 50 \dots 150$; $V \leq 1$ — множитель, отвечающий за ослабление сигнала в атмосфере.

Данное выражение (4) позволяет установить взаимосвязь между техническими характеристиками средства РРТР, РЭС и условий ведения разведки от наиболее важных для определения вероятности параметров — дальности и времени. В связи с тем, что оценка вероятности зависит от двух коэффициентов, результат усреднённой оценки удобно представить в виде 3D графика, позволяющего оперативно рассчитать вероятность зная только время работы РЭС и дальность между этим средством и средством РРТР.

Для удобства и оперативности проведения оценки упростим выражение (4), сгруппировав параметры по принадлежности. Так, объеди-

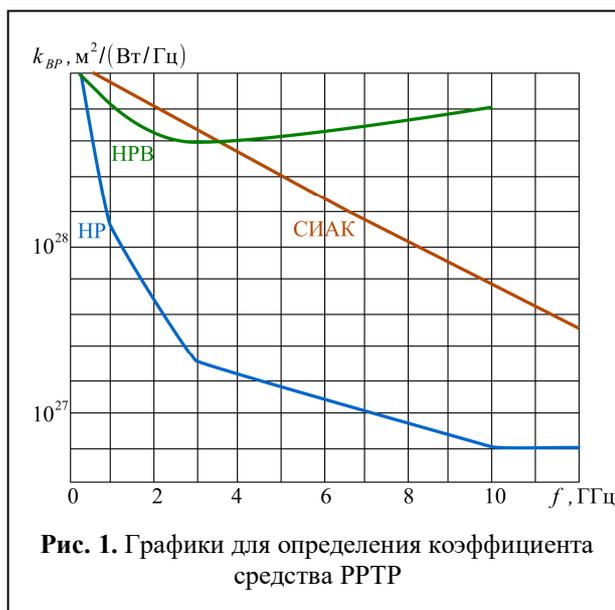


Рис. 1. Графики для определения коэффициента средства РРТР

нив все параметры средства РРТР, получим коэффициент k_{BP} , $[M^2/(Вт/Гц)]$,

$$k_{BP} = \frac{c^2 \cdot 10^{0,1 \cdot R(f_c)}}{(4\pi)^2 \cdot f_c^2 \cdot 10^{0,1 \cdot N_{\min}(f_c)}}. \quad (5)$$

Графики значений коэффициента k_{BP} средства РРТР, полученных с помощью (5), обобщающие технические характеристики средств РРТР $N_{\min}(f_c)$ и $R(f_c)$, таких как стационарные наземные средства (НР), наземные видовые средства (НРВ), а также размещаемые на самолётах иностранных авиакомпаний (СИАК), представлены на рис. 1.

Определив вероятность разведки с учётом фактора времени и дальности ведения разведки, при наличии лесных массивов на трассе, необходимо рассчитать множитель ослабления. Для расчёта ослабления в лесном массиве представим его в виде бесконечного количества цилиндров, с центром в точке (x_n, y_m) . Тогда суммарное поле возле ствола лесного массива $E(x_n, y_m)$ будет складываться из внешнего поля $E_{ПЛАД}(x_n, y_m)$ и полей от остальных деревьев

$$E(x_n, y_m) = E_{ПЛАД}(x_n, y_m) + \sum_{p,q=-\infty}^{p,q=\infty} E_s(x_p, y_p), \quad (6)$$

где $E_s(x_p, y_p) = -g_0 E(x_p, y_p) H_0^{(2)}(k_0 R)$ — поля, рассеянные остальными стволами (p, q — целые числа);

$$H_0^{(2)}(k_0 R) = \sqrt{2/\pi k_0 \rho} \exp[i(\pi/4 - k_0 \rho)];$$

k_0 — волновое число вещества ствола;

$$R = \sqrt{(x_p - x_n)^2 + (y_q - y_m)^2}.$$

Значения x_n, y_m — случайные величины. Допустим, что среднее расстояние между деревьями в лестном массиве будет равно h , приблизительно такого же порядка, как и дисперсия. Тогда, применив к выражению (6) преобразование Фурье, усреднив по координатам и проведя замену операциям суммирования на интегрирование, получаем

$$E(\nu, \mu) = \overline{E_{\text{пад}}(\nu, \mu)} - \frac{g_0}{h^2} \overline{E(\nu, \mu)} \cdot \overline{K(\nu, \mu)}, \quad (7)$$

где

$$\overline{E_{\text{пад}}(\nu, \mu)} = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} E_{\text{пад}}(x, y) \exp[i(\nu x + \mu y)] dx dy;$$

$$\overline{E(\nu, \mu)} = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} E(x, y) \exp[i(\nu x + \mu y)] dx dy;$$

$$\overline{K(\nu, \mu)} = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} H_0^{(2)}(k_0 \sqrt{x^2 + y^2}) \times$$

$$\times \exp[i(\nu x + \mu y)] dx dy =$$

$$= -4i/(k_0^2 - \nu^2 - \mu^2);$$

$$g_0 = \frac{\sqrt{\varepsilon} J_0^*(ka) J_0(k_0 a) - J_0(ka) J_0^*(k_0 a)}{\sqrt{\varepsilon} J_0^*(ka) H_0^{(2)}(k_0 a) - J_0(ka) H_0^{(2)*}(k_0 a)};$$

ε — комплексная относительная диэлектрическая проницаемость вещества ствола; $k = k_0 \sqrt{\varepsilon}$ — волновое число в стволе; J_0 и J_0^* — функция Бесселя нулевого порядка и её производная; $H_0^{(2)}$ и $H_0^{(2)*}$ — функция Ханкеля нулевого порядка и её производная.

Из выражения (7) можно получить уравнение

$$E(x, y) = E_{\text{пад}}(x, y) - \frac{g_0}{h^2} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} E(\zeta, \eta) \times H_0^{(2)}[k_0 \sqrt{(x - \zeta)^2 + (y - \eta)^2}] d\zeta d\eta, \quad (8)$$

а также равенство

$$\overline{E(\nu, \mu)} = \frac{\overline{E_{\text{пад}}(\nu, \mu)}}{1 - \frac{4ig_0}{h^2(k_0^2 - \nu^2 - \mu^2)}}. \quad (9)$$

Одним из вариантов возбуждения колебаний является плоская волна. Тогда $E_{\text{пад}}(\nu, \mu) = E_0 \exp(-ik_0|x|)$. При возбуждении колебаний плоской волной получаем

$$\overline{E_{\text{пад}}(\nu, \mu)} = -\frac{4\pi ik_0 \delta(\mu)}{k_0^2 - \nu^2} E_0, \quad (10)$$

где $\delta(\mu)$ — дельта-функция Дирака.

Применив к полученному в (10) выражению обратное преобразование Фурье, получим решение

$$E(x, y) = E_0 \frac{k_0}{k_{\text{eff}}} (-ik_{\text{eff}}|x|), \quad (11)$$

где $k_{\text{eff}} = \sqrt{k_0^2 - i \frac{4g_0}{h^2}}$.

Для расчёта множителя ослабления получим выражение для мощности рассеяния через интенсивность полей, считая фазы случайными,

$$S(x, y) = S_{\text{пад}}(x, y) - \frac{\sigma_s}{2\pi h^2} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} S(\zeta, \eta) \times \frac{\exp[-(\sigma_i/h^2)\sqrt{(x - \zeta)^2 + (y - \eta)^2}]}{\sqrt{(x - \zeta)^2 + (y - \eta)^2}} d\zeta d\eta, \quad (12)$$

где $S(p) = \text{Re}(E_s H_s^*) = \frac{2|E|^2 \exp(-\sigma_i \rho / h^2)}{\pi Z_0 k_0 \rho}$;

E — напряжённость поля; E_s, H_s — напряжённость рассеянных от деревьев полей, расстояние до которых равно $p = \sqrt{x^2 + y^2}$; Z_0 — волновое сопротивление свободного пространства.

Поток мощности F и интенсивность S связаны между собой как

$$\frac{S\sigma_a}{h^2} = -\text{div}F, \quad (13)$$

следовательно, выражение для потока мощности в радиальном направлении

$$F(\rho) = \frac{\sigma_a}{h^2 \rho} \int_{-\infty}^{\infty} \rho S(\rho) d\rho = \frac{2S_0 h^2}{\pi k_0} \times$$

$$\int_{-\infty}^{\infty} \frac{t J_0(\sigma_t \rho / h^2) dt}{(\sqrt{t^2 + 1} - \sigma_s / \sigma_t)^2 \sqrt{t^2 + 1}}, \quad (14)$$

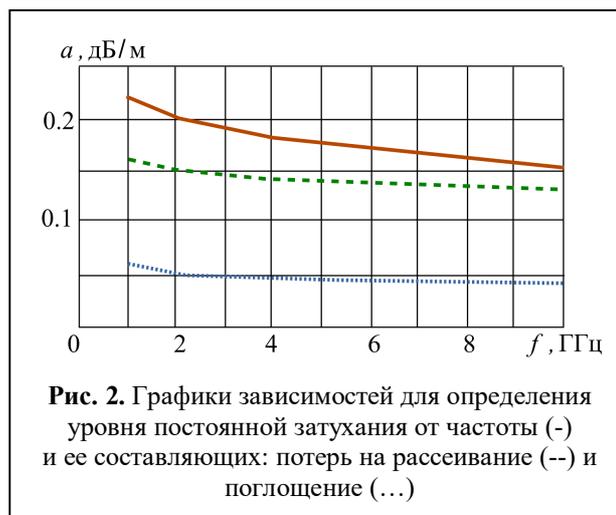
где $J_0(\sigma_t \rho / h^2)$ — функция Бесселя нулевого порядка от отношения полного сечения и расстояния между ближайшими стволами к среднему расстоянию.

Формула (14) описывает сумму двух потоков мощности — когерентного $F_{\text{ког}}$ (информативный сигнал) и диффузного поля $F_{\text{диф}}$ (помеха). Таким образом, $F(\rho)$ является полным потоком мощности в рассматриваемом пространстве.

Рассмотрим типовую задачу оценки развед-доступности радиоэлектронного средства, расположенного вблизи лесного массива, с рабочей частотой 8 ГГц. Лесной массив будет состоять из деревьев с диаметром ствола равным 20 см, концентрации одного дерева на 10 м^2 , $\varepsilon = 7 - 0,7i$. Получим $\text{tg} \delta = 0,1$. В связи с тем, что диаметр ствола больше длины волны рабочей частоты рассматриваемой РЭС, этот случай соответствует толстым цилиндрам, график зависимости уровня постоянной затухания от частоты приведён на рис. 2.

Найдём по графику на рис. 2 уровень постоянной затухания — $\alpha = 0,17 \text{ дБ/м}$. Подставим полученное затухание в оценку вероятности, исходя из длины трассы, проходящей через лесной массив, до средств разведки, и получим итоговую вероятность при размещении ОЗ вблизи или внутри лесных массивов.

Таким образом, предлагаемое в данной статье математическое обеспечение для оперативной оценки возможностей радио- и радиотехнической разведки в условиях лесных массивов основывается на расчёте электромагнитного поля у деревьев и расчёте мощности диффузного рассеяния и когерентного поля. Дальнейшие исследования будут направлены на автоматизацию процесса оценки зон РРТР с учетом полученных множителей ослабления для лесной местности в районе ведения разведки в виде двух алгоритмов — графоаналитического и автоматизированного. Кроме того,



условия ведения разведки предполагают наличие ОЗ в лесных массивах в сложных погодных условиях, что подразумевает дополнительное ослабление, полученное в [10].

Литература

1. *Леньшин А.В.* Бортовые комплексы радиоэлектронной борьбы: учебник. Воронеж: ИПЦ «Научная книга», 2023. 636 с.
2. *Бражников А.Е., Меньшаков Ю.К.* Иностраные разведки. Сегодня. М.: Медиа Группа «Авангард», 2015. 458 с.
3. *Леньшин А.В., Кравцов Е.В., Сеньюков Г.А., Рюмишин Р.И.* Оценка возможностей радиотехнической разведки по результатам контроля радиоэлектронных средств комплексом радиотехнического контроля // Динамика сложных систем – XXI век. 2016. № 3. С. 29–35.
4. *Леньшин А.В., Кравцов Е.В.* Алгоритм распределения разнородного ресурса комплексов и средств комплексного технического контроля по объектам контроля и защиты // Телекоммуникации. 2017. № 8. С. 13–17.
5. *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.
6. *Леньшин А.В., Кравцов Е.В.* Оптимизация распределения разнородного ресурса комплексов и средств комплексного технического контроля по объектам защиты в различных физических полях // Телекоммуникации. 2021. № 2. С. 17–20.
7. *Леньшин А.В., Кравцов Е.В.* Функциональный метод обобщенных параметров для оперативной оценки возможностей технических средств разведки // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. 2021. № 3. С. 23–32.

8. *Кравцов Е.В.* Методический подход к комплексной оперативной оценке возможностей выявления сведений об объектах защиты // Телекоммуникации. 2020. № 9. С. 33–41.

9. *Сидоренко И.А.* Методический подход к оценке средств радиомониторинга при обнаружении излучений радиоэлектронных объектов с учетом временного фактора // Теория и техника радиосвязи. 2022. № 2. С. 76–83.

10. *Леньшин А.В., Кравцов Е.В., Сидоренко И.А.* Математическое обеспечение системы оперативной

оценки возможностей радиолокационной видовой разведки с учетом фактора метеообразований // Всероссийские открытые Армандовские чтения: Современные проблемы дистанционного зондирования, радиолокации, распространения и дифракции волн / Материалы Всероссийской открытой научной конференции. Муром: МИ ВлГУ, 2023. С. 399–404.

Поступила 28 августа 2023 г.

English

MATHEMATICAL TOOL FOR OPERATIONAL ASSESSMENT OF RADIO-ELECTRONIC RECONNAISSANCE CAPABILITIES IN A FOREST AREA

Andrey Valentinovich Lenshin — Grand Dr. in Engineering, Professor of Department 101, Air force Military Scientific Center “Air Force Academy named after Professor N.E. Zhukovskiy and Yu.A. Gagarin”.

E-mail: andrey-lenshin@yandex.ru

Evgeny Vladimirovich Kravtsov — Grand Dr. in Engineering, the Head of Department 54, Air force Military Scientific Center “Air Force Academy named after Professor N.E. Zhukovskiy and Yu.A. Gagarin”.

E-mail: evgenijkravtsov@mail.ru

Ivan Andreevich Sidorenko — Postgraduate Student, Department 54, Air force Military Scientific Center “Air Force Academy named after Professor N.E. Zhukovskiy and Yu.A. Gagarin”.

E-mail: Ivan.Sidorenko.95@yandex.ru

Address: 394064, Russian Federation, Voronezh, Starykh Bolshevikov str., 54 a.

Abstract: The record of current military conflicts reveals the increasing role of counteraction against technical reconnaissance equipment. Measures of comprehensive technical control are to be taken to counteract technical reconnaissance equipment involving a rapid rise in both technical reconnaissance equipment of foreign states, and radio-electronic equipment- protected facilities, recognition signs of which emerge in all physical fields. One of the most dangerous reconnaissance types is various mode-based RER (Radio-Electronic Reconnaissance). RER equipment is widely used on board of foreign airlines flying over the Russian Federation territory and in border areas. Analysis of the current status and development potential of RER equipment enables to define tasks that can be solved through this equipment during reconnaissance activities. Visual electro-optical reconnaissance is an equally dangerous type of technical reconnaissance and to counteract this there is radio-electronic equipment installed either within forest areas or nearby which makes difficulties in assessing reconnaissance accessibility of protected facilities by RER equipment. The article's aim is to substantiate mathematical tool for operational evaluation of RER capabilities to obtain guarded data about protected facilities. The mathematical tool proposed for use is based on calculating the attenuation factor in radio-frequency line passing through a forest area, which enables operational assessment of RER capabilities in forest areas. It is based on calculation of the electromagnetic field near trees and calculation of power for diffracted scattering and coherent field.

Keywords: detection probability, radio reconnaissance, electronic reconnaissance, operational assessment, attenuation factor, forest area.

References

1. *Lenshin A.V.* Airborne electronic warfare systems: textbook. Voronezh: CPI «Nauchnaja kniga», 2023. 636 p.
2. *Brazhnikov A.E., Men'shakov Ju.K.* Foreign intelligence. Today. Moscow.: Media Group «Avangard», 2015. 458 p.

3. *Lenshin A.V., Kravtsov E.V., Senjukov G.A., Rjumshin R.I.* Evaluation of the capabilities of radio-technical intelligence based on the results of the control of radio-electronic means by the complex of radio-technical control. Dynamics of complex systems – XXI century. 2016. No. 3. Pp. 29–35.

4. *Lenshin A.V., Kravtsov E.V.* Algorithm of distribution of heterogeneous resource of complexes and means of complex technical control on objects of control and protection. Telecommunications. 2017. No. 8. Pp. 13–17.

5. *Lenshin A.V., Kravtsov E.V.* Methodology of adaptive distribution of forces and means of complex technical control over protection objects in various physical fields of spaced reception. Radioengineering and telecommunication systems. 2020. No. 4. Pp. 15–22.

6. *Lenshin A.V., Kravtsov E.V.* Optimization of the distribution of a heterogeneous resource of complexes and means of complex technical control over objects of protection in various physical fields. Telecommunications. 2021. No. 2. Pp. 17–20.

7. *Lenshin A.V., Kravtsov E.V.* Functional method of generalized parameters for operational evaluation of the capabilities of technical means of intelligence. Radioengineering and telecommunication systems. 2021. No. 3. Pp. 23–32.

8. *Kravtsov E.V.* Methodological approach to a comprehensive operational assessment of the possibilities of identifying information about the objects of protection. Telecommunications. 2020. No. 9. Pp. 33–41.

9. *Sidorenko I.A.* Methodological approach to the evaluation of radio monitoring tools for detecting radiations of radio-electronic objects, taking into account the time factor. Theory and technology of radio communication. 2022. No. 2. Pp. 76–83.

10. *Lenshin A.V., Kravtsov E.V., Sidorenko I.A.* Mathematical support for the system of operational assessment of the capabilities of radar visual reconnaissance taking into account the factor of meteorological formations. All-Russian open Armand readings: Modern problems of remote sensing, radar, propagation and diffraction of waves. Materials of the All-Russian Open Scientific Conference. Murom: MI VISU, 2023. Pp. 399–404.