

## УДК 162.3

*В.М. Быков, н.с., ИРЭ НАН Украины,  
В.А. Комяк, канд. ф.-м. наук, с.н.с., ИРЭ НАН Украины,  
В.К. Мунтян, канд. техн. наук, заведующий кафедрой, НУГЗУ,  
В.Н. Акулов, преподаватель, НУГЗУ*

**ОБОСНОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ  
РАДИОТЕПЛОЛОКАТОРА ДЛЯ ВЫЯВЛЕНИЯ  
РАДИОТЕПЛОКОНТРАСТНЫХ УЧАСТКОВ ЛАНДШАФТА В  
ПРОЦЕССЕ ЛИКВИДАЦИИ ЛЕСНОГО ПОЖАРА СИТУАЦИЙ**  
(представлено д-ром техн. наук Алексеевым О.П.)

В статье рассмотрено физическое обоснование применения бортового радиотеплолокатора для выявления радиотеплоконтрастных участков ландшафта и использования полученной информации с целью наведения авиации на примере ликвидации лесного пожара.

**Ключевые слова:** модель теплового излучения, радиотепловой контраст, пожарная авиация

**Постановка проблемы.** Лесной пожар является одним из видов чрезвычайных ситуаций (ЧС) – код этой ЧС согласно ДК-019 2001 – 20510. Использование пожарной авиации (ПА) для тушения ландшафтных пожаров широко внедряется в мировую практику борьбы с чрезвычайными ситуациями. Пожарные самолеты и вертолеты решают проблему доставки больших масс огнетушащих веществ в труднодоступных районах, а при тушении верховых лесных пожаров могут быть единственным эффективным средством борьбы с ними. Основной проблемой применения ПА является наведение авиационных средств (АС) на очаг пожара и определения штурманом времени сброса воды [1]. В реальных условиях крупного пожара его очаг скрыт мощным дымовым шлейфом (особенно в зоне фронта пожара и перед ним) и использование наземных ориентиров малоэффективно. Еще более остро задача наведения стоит при создании заградительных полос на путях распространения огня с помощью сброса воды с борта летательных аппаратов (ЛА). Согласно практике применения авиации в борьбе с лесными пожарами в США [2] при локализации очага заградительная полоса создается последовательным сбросом воды с самолетов перед фронтом пожара. При этом зоны покрытия лесных горючих материалов сброшенной водой с отдельных ЛА должны перекрываться для исключения прорыва огня по неувлажненному пространству между «пятнами». Пример схемы сброса представлен на рис. 1 [2]. Для облегчения визуального наблюдения места сброса предыдущими ЛА вода окрашивается контрастным веществом, что должно облегчать работу экипажа. Од-

нако, наличие дымового шлейфа и возможное затенение мест сброса кронами окружающих деревьев (особенно при предельно малых допустимых рабочих высотах полета танкера) могут существенно снизить эффективность использования «окрашивания». Поэтому актуальным становится применение инструментальных средств навигации АС.

В работе [3] для повышения точности наведения АС на очаг пожара предложено использовать инструментальные методы на основе радиотеплолокатора (РТЛ), работающего в микроволновом диапазоне радиоволн. Дальнейшие исследования показали эффективность этих методов и для навигации ПА при создании заградительных полос перед фронтом лесного пожара. В данной работе рассмотрены физические предпосылки для инструментальной навигации АС при таком применении ПА.

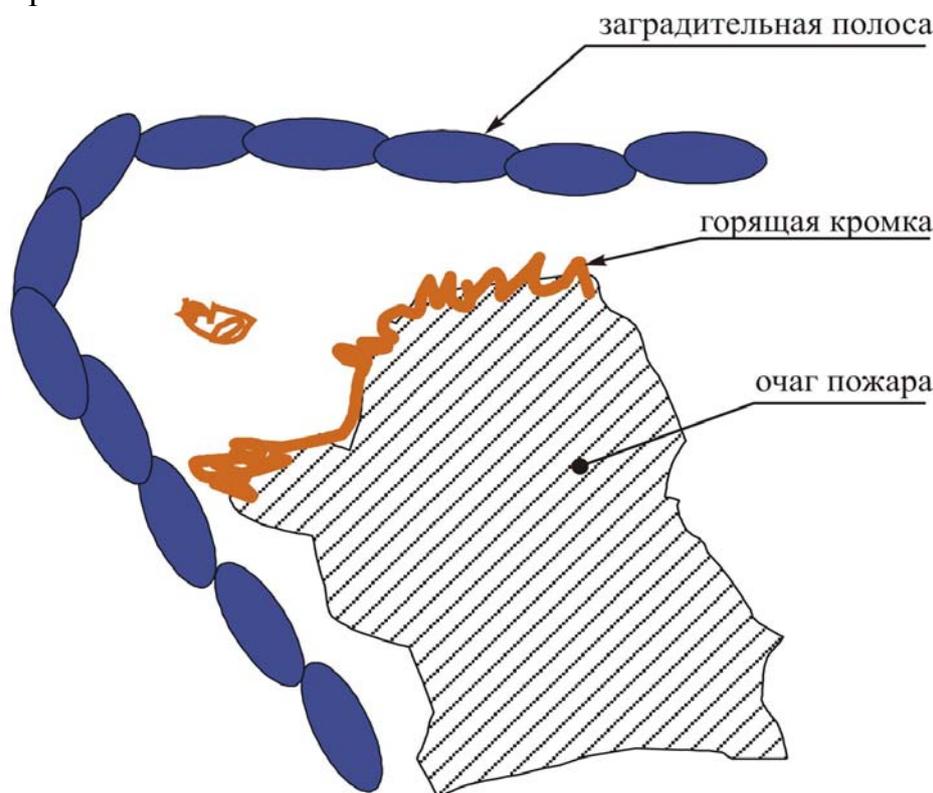


Рис. 1 – Схема построения заградительной полосы перед фронтом лесного пожара [2]

**Анализ последних достижений и публикаций.** Авторами работ [4, 5] рассчитаны поля плотности наземного распределения воды, сброшенной с пожарных самолетов АН – 32 П с высоты 40 м и Ил – 76 МД с высоты 100 м соответственно. Расчеты показывают, что количество воды, достигающей поверхности лесных горючих материалов, не превышает нескольких миллиметров на кв. метр, а площади, на которых возможно изменение влажности почвенного покрова до критической, т.е. изменение пирологических характеристик лес-

ных горючих материалов (ЛГМ), составляют  $\sim 100 \text{ м}^2$  (согласно [6] это количество соответствует  $\geq 3 \text{ мм/м}^2$ ).

Процесс создания заградительной полосы с помощью пожарной авиации можно рассматривать как увлажнение лесных горючих материалов (ЛГМ) атмосферными осадками. При этом следует учитывать, что, как указывается в [6], этот процесс сопровождается последовательным задержанием осадков пологом древостоя, живым наповенным покровом и подстилкой. При прохождении осадков сквозь полог древостоя часть их задерживается на поверхности листьев (хвои), ветвей и стволов. Остальная часть либо непосредственно достигает напочвенного покрова, либо стекает по стволам и опадает с крон деревьев. Малые осадки полностью или почти полностью задерживаются пологом древостоя. С увеличением силы дождя доля проникающих сквозь полог осадков нарастает, при полном насыщении полог перестает задерживать осадки и вся попадающая на него влага достигает напочвенного покрова. Максимальное количество воды, задерживаемое при полном смачивании всех наземных частей деревьев, характеризует влагоемкость лесного полога, которая в течение вегетационного периода пропорциональна листовому индексу насаждений [6]. Полагая, что количество влаги  $R_\delta$ , задерживаемых пологом древостоя, пропорционально его сомкнутости  $\delta$ , для насаждений с произвольной полнотой можно записать:

$$R_\delta = \delta \cdot R^* [1 - \exp(-\rho q)] \quad (1)$$

где  $\delta$  - сомкнутость древесного полога,  $0 < \delta \leq 1,0$ ;  $R_\delta$  - количество осадков, задержанных пологом древостоя с сомкнутостью крон  $\delta$ , мм;  $R^*$  - полная влагоемкость полога древостоя, мм;  $q$  - количество выпавших осадков, мм;  $\rho$  - постоянный коэффициент для данного типа насаждений.

В соответствии с [6], численные значения параметров, найденные по экспериментальным данным, для сомкнутых сосняков составляют  $R_c^* = 4,5$  и  $\rho_c = 0,11$ , а для сомкнутых ельников -  $R_e^* = 6,5$  и  $\rho_e = 0,135$ .

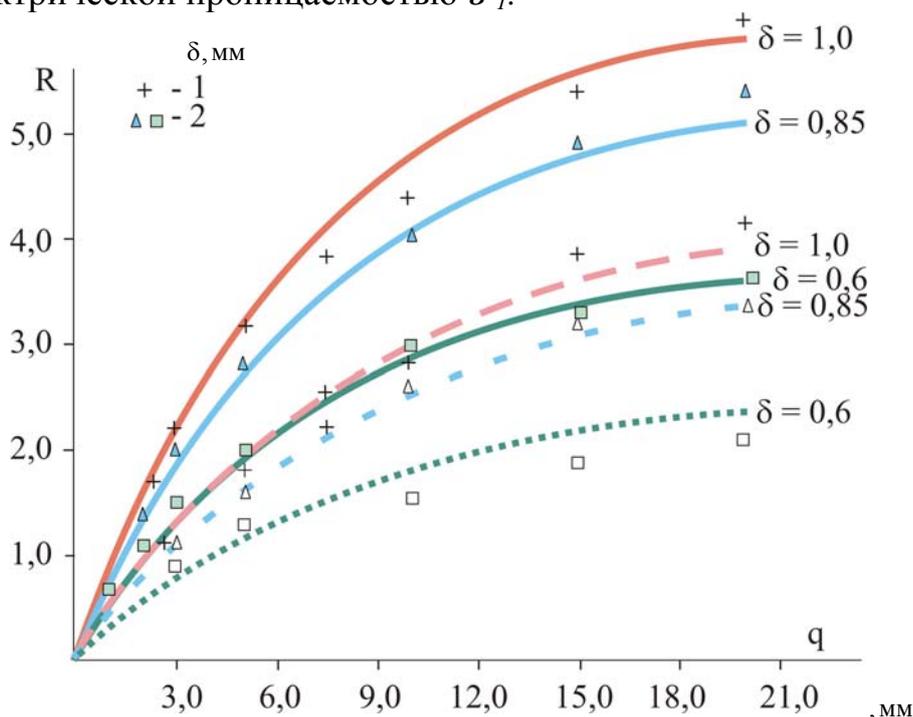
На рис. 2 представлены расчетные и экспериментальные зависимости количества влаги, задержанной пологом древостоев разной сомкнутости, при различной величине осадков.

Задержанная кронами вода существенно изменяет интенсивность собственного радиотеплового излучения участка леса в микроволновом диапазоне за счет дополнительного рассеяния излучения на обводненных хвоинках [7] и образовавшихся на них капельках воды. Такие локальные зоны с повышенным рассеянием должны контрастно

выделяться на радиотепловом изображении местности, получаемым РТЛ [3], которое может быть выведено на монитор штурмана ЛА.

**Постановка задачи и ее решение.** Рассмотрим влияние эффектов рассеяния на уровень собственного радиотеплового излучения участка хвойного леса. Формирующая излучение среда в этом случае может быть представлена плоскостой моделью [8].

Предположим, что над полубесконечным пространством с температурой  $T_0$  (подстилающая поверхность, в нашем случае наземные ЛГМ) расположен плоскопараллельный поглощающий слой (растительность) толщиной  $Z_{e\delta}$  со средней температурой  $T_1$  и диэлектрической проницаемостью  $\epsilon_1^*$ .



**Рис. 2 – Количество влаги ( $R_\delta$ ), задержанной пологом древостоев разной сомкнутости ( $\delta$ ), при различной величине осадков ( $q$ ) [6]: ельники – сплошные линии, сосняки – пунктир; 1, 2 – эксперимент**

Влияние этого слоя на общее излучение системы будет выражаться в ослаблении излучения полупространства  $T_0$  на величину

$$y(\theta_1) = \exp[-\gamma_1 Z_{кр} \sec \theta_1] \tag{2}$$

где  $\gamma_1$  - удельный коэффициент поглощения слоя растительности,  $\theta_1$  - угол, связанный с углом наблюдения  $\theta$  законом Снеллиуса, и внесении собственного излучения.

Выражение для радиояркой температуры  $\dot{O}_\beta$ , общепринятой меры интенсивности теплового излучения, может быть записано как

$$\dot{O}_\beta = y(\theta_1)T_0 + [1 - y(\theta_1)]T_1 \quad (3)$$

При проведении наблюдений радиотепловых контрастов участков леса в коротковолновой части СВЧ диапазона кроме эффектов поглощения в кронах деревьев необходимо учитывать рассеяние излучения на листьях и хвоинках [8].

Для случая рассеяния радиоизлучения цилиндрами с размерами  $a \ll \lambda \ll l$ , где  $a$  - радиус цилиндра,  $l$  - его длина,  $\lambda$  - длина радиоволны. При этом коэффициент ослабления (поглощение плюс рассеяние) авторы [8] предлагают рассчитывать как

$$\gamma = -\frac{4}{\pi^2}kNV \cdot \text{Im}(m^2 - 1) + 8kNV \cdot \frac{4}{\pi^2} \cdot \text{Re} \left[ 1 + \frac{b}{4d} \cdot \ln \frac{(b-d)^2}{(b+d)^2} \right], \quad (4)$$

где  $b = \sqrt{2(1 - m^{-2})}$ ;  $d = (1 - m^{-2})$ ;  $\text{Re}$  - действительная часть;  $\text{Im}$  - мнимая часть;  $m^2$  - комплексная диэлектрическая проницаемость частицы ( $\epsilon^*_{\text{воды}}$ );  $N$  - объемная концентрация частиц;  $V = \pi a^2 l$  - объем частицы. Первый член в (4) дает ослабление излучения за счет поглощения, второй член появляется вследствие рассеяния излучения частицами.

Учет рассеяния излучения применительно к рассмотренным выше моделям приводит к некоторому изменению выражений для вклада собственного радиотеплового излучения слоя растительности.

Параметр  $y(\theta_1)$ , входящий в выражения (2), (3), теперь будет иметь два значения:  $y^*(\theta_1)$  будет ответственным за ослабление сигнала в слое, а  $y^{**}(\theta_1)$  - за формирование собственного радиотеплового излучения. С учетом этого, выражение (3) примет вид:

$$\dot{O}_\beta = y^*(\theta_1)T_0 + [1 - y^{**}(\theta_1)]T_1 \quad (5)$$

где  $y^*(\theta_1) = \exp[-\gamma^* Z_{\text{ед}} \sec \theta_1]$  - общее ослабление сигнала, рассчитываемое по (4), а  $y^{**}(\theta_1) = \exp[-\gamma^{**} Z_{\text{ед}} \sec \theta_1]$  - ослабление за счет поглощения, рассчитываемое для:

$$\gamma^{**} = -\frac{4}{\pi^2}kNV \cdot \text{Im}(m^2 - 1) \quad (6)$$

В микроволновом диапазоне из-за значительного ослабления излучения в кронах деревьев за счет высоких значений мнимой части диэлектрической проницаемости воды (на длине волны  $\lambda \sim 3$  см  $\epsilon_A'' \square 30$ ) и высокой объемной плотности хвои ( $NV \square 10^{-2}$  [8]) первым слагаемым в (5) можно пренебречь, а для сред с высоким уровнем рассеяния, к которым относятся и молодые хвойные насаждения, выражение (5) можно записать как (для леса  $\theta_1 \cong \theta$ ):

$$T_{\text{я}} = (1 - \omega)[1 - y^{**}(\theta)]\Gamma_1, \quad (7)$$

где  $\omega$  - альбеде однократного рассеяния (первое приближение многократного);  $y^{**}(\theta) = \exp[-\gamma^{**}Z_{\text{кр}} \sec \theta]$ .

Использованный в (7) термин альбеде показывает долю рассеяния в общем ослаблении сигнала в среде:

$$\omega = \frac{\sigma_{\delta\alpha\tilde{n}\tilde{n}}}{\sigma_{\delta\alpha\tilde{n}\tilde{n}} + \sigma_{i\tilde{i}\tilde{a}\tilde{e}}}, \quad (8)$$

где  $\sigma_{\delta\alpha\tilde{n}\tilde{n}}$  и  $\sigma_{i\tilde{i}\tilde{a}\tilde{e}}$  - сечения рассеяния и поглощения, соответственно [9].

В соответствии с [9] для сферических частиц, какими можно считать капельки воды на хвоинках:

$$\sigma_{\text{расс}} = \frac{8}{3}\pi k^4 |\alpha|^2 \quad (9)$$

$$\sigma_{\text{погл}} = 4\pi k \text{Im} \alpha, \quad (10)$$

где  $k = \frac{2\pi}{\lambda}$  - волновое число;  $\lambda$  - длина радиоволны;  $\alpha$  - поляризуемость [9], определяемая диэлектрическими свойствами рассеивателя  $\epsilon^* = \epsilon' + i\epsilon''$  и его размерами.

Вода, покрывшая хвоинки за счет смачивания, учитывается в (6).

Расчеты радиотепловых контрастов зон, подвергшихся «орошению» с борта ЛА, проводились для приближений, приведенных ниже.

На покрытие хвоинок водой для молодых ельников ( $N_{\text{хвоинок}} \sim 50000$  в  $1 \text{ м}^2$  кроны) требуется 0,6 л воды, для сосняков ( $N_{\text{хвоинок}} \sim 5000$  в  $1 \text{ м}^2$  кроны) – 0,3 л [10]. Остальная задержанная кронами вода (см. рис. 2) оседает на хвоинках в виде капелек. Для 1 мм капли ее объем  $V = 0,5 \text{ мм}^3$ , а для 2 мм капли –  $V = 4,2 \text{ мм}^3$ . В 1 литре -  $10^6$

мм<sup>3</sup>, т.е. при 1 л/м<sup>2</sup> «избыточной» воды число капелек диаметром 1 мм –  $2 \times 10^6$ , число капелек диаметром 2 мм –  $2 \times 10^5$ .

В результате расчетов определена чувствительность излучения системы почва – лес к задержанной пологом влаге  $\Delta \dot{O}_\beta / \Delta R_\delta$  [7]. На длине радиоволны  $\lambda \sim 8$  мм чувствительность составляет - 25 К/мм для сосняков, и - 40 К/мм для молодых ельников при диаметре капель 2мм в предположении, что капля соответствует каждой их хвоинок.

Для радиотепловых систем обнаружения критерием качества принято считать вероятность правильного обнаружения. Вероятность правильного обнаружения радиотеплового контраста «пятна»  $\delta T_\Pi = T_{\text{яп}} - T_{\text{я фона}}$  в радиотеплолокации может быть определена как [3]:

$$P_D(L) = \frac{1}{2} \left[ 1 + \hat{O} \left( \frac{\delta \dot{O}_i - L}{\sqrt{2} \Delta \dot{O}_{\min}} \right) \right] \quad (11)$$

где  $L$  - выбранный порог;  $\Delta T_{\min}$  - чувствительность радиометра;  $L \approx q_m \Delta T_{\min}$ ;  $q_m$  - надежность обнаружения;  $\Phi(z)$  - интеграл вероятности, т.е. вероятность правильного обнаружения в основном определяется радиотепловым контрастом объекта и чувствительностью системы, т.е. отношением сигнал/шум, и для РТЛ, предложенного в [3], при чувствительности 1К – 2К будет превышать 0,9 при надежности  $q_m = 6$ .

Схема наблюдения РТЛ для этого случая приведена на рис. 3. Сектор сканирования антенны РТЛ составляет  $\pm \Delta\beta$ , для современных систем  $\pm 60^\circ$ .

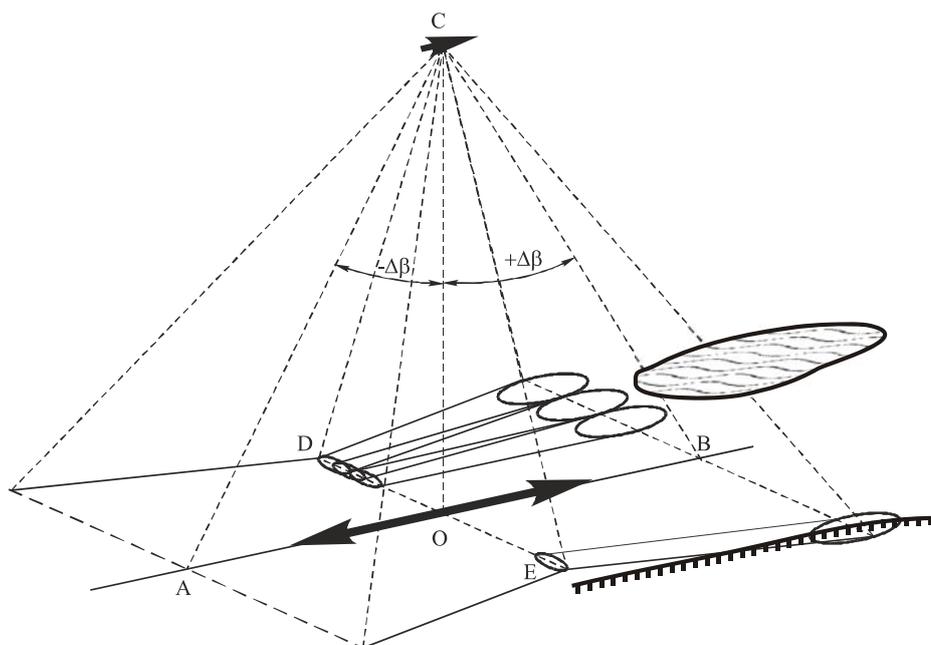


Рис. 3 – Схема наблюдения зоны «орошения» с помощью бортового РТЛ [3]

На рис. 3 стрелка в точке С указывает направление полета ЛА. По достижении линией DE дальнего края зоны «орошения», выделенной на рисунке, штурманом принимается решение о сбросе воды (На рисунке также схематически показана горящая кромка очага лесного пожара). В соответствии с [4, 5] при этом будет достигнуто перекрытие «пятен» на земной поверхности.

**Выводы.** В работе показана перспективность применения радиотеплолокаторов микроволнового диапазона для наведения авиационного пожарного танкера для построения заградительных полос при локализации крупных лесных пожаров. Высокая чувствительность радиоизлучения к задержанной кронами влаги в принципе позволит экипажу ЛА с достаточно высокой достоверностью различать на радиотепловом изображении зоны с различным содержанием задержанной кронами воды внутри «пятна».

По этой же схеме возможно применение бортового РТЛ и для борьбы с ландшафтными пожарами на безлесной территории, например, с крупными степными пожарами.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Мунтян В.К. Влияние параметров полета самолета Ан-32П на точность сброса огнетушащего вещества / В.К. Мунтян, Р.Г. Мелещенко // Проблемы пожарной безопасности: Сб. науч. тр. НУГЗ Украины – Харьков, 2009. – Вып. 25. – С. 132 – 136.
2. Грін Б. Протипожежна концепція військових сил США // Доп. на Міжнарод. семінарі «Гасіння лісових пожеж із застосуванням авіації» - Полтава, 2 – 3 червня 2009 р.
3. Абрамов Ю.А. Обнаружение очагов лесных пожаров и прогноз динамики их распространения / Ю.А. Абрамов, В.А. Комяк, В.М. Комяк, Г.В. Рева, В.Е. Росоха // - Харьков: АГЗУ, 2004. – 146с.
4. Мунтян В.К. Моделирование траектории полета ядра воды, сброшенной с пожарного самолета Ан-32П / В.К. Мунтян, Р.Г. Мелещенко // Проблемы пожарной безопасности: Сб. науч. тр. НУГЗ Украины – Харьков, 2010. – Вып. 27. – С. 145 – 150.
5. Москвилин Е.А. Применение авиации для тушения лесных пожаров // Пожарная безопасность. – М.: 2009. - № 1. – С. 89 – 92.
6. Коровин Г.Н. Авиационная охрана лесов / Г.Н. Коровин, Н.А. Андреев // – М.: Агропромиздат, 1988. – 220 с.
7. Гранков А.Г. Моделирование характеристик радиотеплового излучения увлажненного осадками лесного полога в миллиметровом, сантиметровом и дециметровом диапазонах/ А.Г. Гранков, А.А. Мильшин, А.А. Чухланцев // Радиотехника. и электрон. – 2005. – т. 50, № 12. – С. 1447 – 1450.

8. Быков В.М. Влияние крон деревьев на уровни излучения подстилающей поверхности / В.М. Быков, В.А. Комяк, О.Е. Маракивский // Вестник Национального техн. ун-та «ХПИ». Сб. научн. тр. Тем. выпуск: Новые решения в совр. технологиях. – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2002. - № 20. – С. 222 – 226.

9. Ван де Хюлст Г. Рассеяние света малыми частицами. М.: ИЛ, 1961. – 536 с.

10. Schwering F.K., Millimeter wave propagation in vegetation: Experiment and Theory./ F.K. Schwering, E.J. Violette, R.H. Espeland // IEEE Tr. on Geosc. Remote Sens., - v.26, N 3. –1988. –P. 355 – 367.  
nuczu.edu.ua

В.М. Биков, В.О. Комяк, В.М. Акулов, Ю.М. Райз

**Обґрунтування можливості використання радіотеплолокатора для виявлення радіотеплоконтрастних ділянок ландшафту у процесі ліквідації лісових пожеж.**

У статті розглянуто фізичне обґрунтування застосування бортового радіотеплолокатора для виявлення радіотеплоконтрастних ділянок ландшафту та використання отриманої інформації з метою наведення авіації на прикладі ліквідації лісової пожежі.

**Ключові слова:** модель теплового випромінювання, радіотепловий контраст, пожежна авіація.

Bykov V.M., Komyak V.A., Mountyan V.K., Akulov V.N.

**Information support for radio heat locator used for revealing of radio heat contrasting landscape areas during emergency situations.**

The article describes physical grounding for using of airborne radio heat locator for revealing of radio heat contrasting landscape areas and using of the received information for navigation of fire aviation against forest fires.

**Key words:** model of thermal exposure, radio heat contrast, fire aviation.