

## СВЧ радиометрическая модель очага возгорания лесного пожара

**В.П. Саворский, В.И. Каевицер, И.Н. Кибардина,  
С.М. Маклаков, О.Ю. Панова, А.А. Чухланцев**

*Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН,  
Фрязинский филиал  
141190, Фрязино, Московской обл., пл. Введенского, 1  
E-mail: savor@ire.rssi.ru*

Крупномасштабная засуха в европейской части России летом 2010 года вызвала катастрофические лесные и торфяные пожары. В связи с этим новый импульс получил запрос на разработку средств обнаружения очагов пожаров, в частности, на разработку эффективных инструментов раннего обнаружения лесных и торфяных пожаров в условиях, характерных для европейской части России. Представленная работа направлена на научное обоснование применения бортовых СВЧ радиометрических комплексов для обнаружения очагов лесных и торфяных пожаров на ранней стадии их развития. С этой целью разработана модель, описывающая особенности СВЧ радиометрических наблюдений очагов возгорания с самолета или вертолета в сантиметровом/дециметровом СВЧ диапазонах. Разработанная модель позволяет оценивать СВЧ характеристики лесных пожаров на ранней стадии их развития с учетом экранирующего влияния растительного покрова и конечных размеров диаграммы направленности антенной системы. Результаты моделирования СВЧ характеристик лесных пожаров использованы для определения оптимальных СВЧ диапазонов для обнаружения очагов возгорания в зависимости от высоты растительного покрова.

**Ключевые слова:** СВЧ-радиометрия, лесные пожары, модель излучения, радиотепловое излучение, мобильный СВЧ радиометрический комплекс.

### Введение

В данной работе представлена модель, описывающая особенности наблюдения лесных пожаров с самолета или вертолета с применением СВЧ радиометрического комплекса сантиметрового/дециметрового диапазонов. Эта модель использована для анализа особенности теплового излучения пожара в СВЧ диапазоне. Результаты анализа позволяют определять характеристики СВЧ излучения лесного пожара на его ранней стадии, когда огонь полностью экранирован от наблюдателя слоем растительности.

Разработанная модель дает возможность оценивать минимальные размеры лесных пожаров, которые может обнаруживать СВЧ радиометрический комплекс сантиметрового/дециметрового диапазонов. Длины волн, на которых возможно обнаруживать пожары наименьших размеров при прочих равных условиях, являются, по постановке задачи, оптимальными для обнаружения очагов возгорания.

## 1. Модель излучения

### 1.1 Лесные пожары

Модель, разработанная ниже, основывается на том, что СВЧ радиометрический комплекс должен быть использован в целях раннего обнаружения пожаров. В этом случае модель строится для лесных пожаров в начальной стадии их развития, когда они закрыты от регистрирующей системы растительным покровом. Следовательно, модель СВЧ излучения должна учитывать существенное ослабление огня кронами деревьев.

Интенсивность радиотеплового излучения лесных пожаров, наблюдаемого в СВЧ диапазоне с низколетящих носителей (самолет, вертолет), может быть описана следующим соотношением [1]:

$$T_{obs} = \kappa_0 T_0 e^{-\alpha_1} e^{-\alpha_2} + \kappa_1 T_1 e^{-\alpha_2} + \kappa_2 T_2, \quad (1)$$

где  $T_0, T_1, T_2$ , термодинамические температуры земной поверхности, огня, и крон деревьев, соответственно,

$\kappa_0, \kappa_1, \kappa_2$  - излучательные способности земной поверхности, огня и крон деревьев в СВЧ диапазоне, соответственно,

$\alpha_1, \alpha_2$  – полные коэффициенты ослабления СВЧ излучения лесных пожаров и крон деревьев, соответственно.

В (1) не учитывается затухание СВЧ излучения в атмосфере. Это возможно, поскольку модель предназначена для дистанционных наблюдений с низколетящих носителей. Кроме того, для простоты анализа вместо реального пространственного распределения температуры в пламени вводится его эффективная температура  $T_f$ . Для того чтобы избежать ложных выводов, применимость СВЧ радиометрического метода оценивается для наиболее типовых, т.е. наиболее вероятных, температур пожара. Таким образом, оцениваются потенциальные возможности обнаружения очагов лесных пожаров по их СВЧ радиометрическим характеристикам для наиболее вероятных случаев их наблюдения.

В период наибольшей пожароопасности можно рассматривать лес как среду, находящуюся в термодинамическом равновесии. Необходимо учитывать также то, что наибольшая пожароопасность связана с высыханием почвы и лесного напочвенного покрова. В этих условиях коэффициент излучения лесной подстилки и почвы имеют близкие к максимальным значения, достигающие  $0.9 \div 0.95$ . Поэтому возможно упростить анализ, предположив:

$$T_0 \approx T_2 \quad (2)$$

$$\kappa_0 \approx 1 \quad (3)$$

Анализ погрешностей модели показывает, что предположения (2) и (3) приводят к относительной модельной погрешности, не превышающей 10%. Как можно увидеть ниже, такие величины погрешностей не искажают основные результаты данной работы.

Излучательные способности пламени и полога леса могут быть выражены через коэффициенты затухания следующим образом [2]:

$$\kappa_1 = 1 - e^{-\alpha_1} \quad (4)$$

$$\kappa_2 = 1 - e^{-\alpha_2} \quad (5)$$

В результате наблюдаемая радиояркостная температура лесных пожаров может быть описана следующим выражением:

$$T'_{obs} \cong T_0 + (1 - e^{-\alpha_1}) e^{-\alpha_2} (T_1 - T_0) \quad (6)$$

Данное выражение является базовым для анализа особенностей наблюдаемых СВЧ характеристик лесных пожаров, укрытых покровом растительности, т.е. кронами деревьев.

## 1.2 Модель поглощения СВЧ излучения в пламенах лесных пожаров

Пламя лесного пожара представляет собой слабоионизованную среду, т.е. низкотемпературную плазму. В этом случае полное ослабление СВЧ излучения в слое пламени определя-

ется двумя составляющими: 1) ослаблением  $k_{fe}$ , вызванным взаимодействием СВЧ излучения со свободными электронами, 2) ослаблением  $k_{fp}$ , вызванным поглощением СВЧ излучения на мелких углеродных частицах (типа сажи), присутствующих в пламенах при сгорании углеводородных материалов [2]:

$$\alpha_1 = (k_{fe} + k_{fp})h_f \quad (7)$$

где  $h_f$  - высота пламени.

На круговой частоте  $\omega$  погонное поглощение СВЧ излучения при взаимодействии со свободными электронами плазмы можно оценить из следующего соотношения [3]:

$$k_{fe} = 2 \frac{\omega}{c} \sqrt{\frac{1}{2} \left( 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2 + \nu^2} \right)} \left[ -1 + \sqrt{1 + \frac{\nu^2 \omega_p^4}{\omega^2 (\omega^2 + \nu^2 - \omega_p^2)^2}} \right] \quad (8)$$

где  $\nu$  - частота столкновений электронов,  $c$  - скорость света.

Плазменную частоту  $\omega_p$  можно определить из соотношения

$$\omega_p^2 = N'e^2/\varepsilon_0 m \quad (9)$$

где  $N'$  - плотность электронов в плазме (пламени),  
 $e$  - заряд электрона,  $m$  - масса электрона,  
 $\varepsilon_0$  - диэлектрическая проницаемость вакуума.

На круговой частоте  $\omega$  погонное поглощение СВЧ излучения, вызванное поглощением СВЧ излучения на мелких углеродных частицах можно определить из следующего соотношения [2]:

$$k_{fp} [M^{-1}] = N_0 \frac{\omega^2 [c^{-1}] a^3 [M]}{c^2 [M/c]} \left( \frac{1}{10\sigma [Cm/M]} + 16\pi^2 a^2 [M] \right) \quad (10)$$

где  $N_0$  - плотность углеродных частиц,  
 $a$  - радиус углеродных частиц,  
 $\sigma$  - проводимость углеродных частиц.

### 1.3 Модель поглощения СВЧ излучения в растительном покрове

Поглощение электромагнитного излучения в растительном покрове может быть представлено в следующем упрощенном виде [4]:

$$\alpha_2 = k_t H_t = A f^\beta H_t \quad (11)$$

где  $A = 8 \cdot 10^{-4}$ ,  $\beta \approx 0.8$ ,  $f$  - радио частота МГц,  $H_t$  - высота дерева.

Эта модель позволяет описать поглощение СВЧ излучения для всех основных типов леса – бореальных, среднеширотных (лиственных) и тропических. Следует отметить, что эта модель

действует в диапазоне 40-9000 МГц. Как будет показано ниже, именно СВЧ диапазон 1000-9000 МГц (1-9 ГГц) является наиболее перспективным для раннего обнаружения лесных пожаров.

#### 1.4 Учет размера диаграммы направленности антенной системы СВЧ радиометрического комплекса

Для обнаружения лесных пожаров на ранних стадиях их развития необходимо учитывать конечный размер пятна диаграммы направленности антенн СВЧ радиометрического комплекса. При зондировании в надир полуширина диаграммы направленности определяется следующим дифракционным соотношением:

$$\Delta \vartheta \approx \frac{\lambda}{d} = \frac{2\pi c}{\omega d} \quad (12)$$

где  $\lambda$  - длина волны зондирования,  $d$  - апертура антенной системы,  $c$  - скорость света.

В соотношении (12) опущен форм-фактор порядка 1, так как он не меняет значения представленных ниже основных результатов для оптимальных оценок частот СВЧ мониторинга. Соотношение (12) определяет площадь пятна диаграммы направленности:

$$S = \pi \left( A \tan\left(\frac{2\pi c}{\omega d}\right) \right)^2 \quad (13)$$

где  $A$  является высотой полета, с которого проведены дистанционные измерения. Учитывая то, что в условиях реальных наблюдений  $\frac{2\pi c}{\omega d} \ll 1$ , можно выразить (13) в упрощенной форме:

$$S = \pi \left( A \frac{2\pi c}{\omega d} \right)^2 \quad (14)$$

При наблюдении лесного пожара СВЧ радиометрической системой с флуктуационной чувствительностью  $\Delta_{\sigma}$  минимальный размер площади огня  $S_x$ , которую данная радиометрическая система может обнаружить, задается следующим соотношением:

$$S_x = \frac{\Delta_{\sigma}}{T_{obs} - T_0} S \quad (15)$$

где  $T_{obs}$  рассчитывается из соотношения (6).

## 2. Численное моделирование лесных пожаров

Численное моделирование ослабления СВЧ излучения в пламенах пожаров сосновых лесов проведено на базе отношений (8-10). Результаты расчетов погонного ослабления СВЧ излучения для этих условий представлены на рис. 1. Согласно данным из работы [5] в расчетах для лесных пожаров принято, что электронная плотность равна  $1,00 \times 10^{16} \text{ м}^{-3}$ , а частота столкновений электронов –  $3,43 \div 5,97 \times 10^{10} \text{ с}^{-1}$ . Для расчета ослабления СВЧ излучения на углеродных частицах принято, что их средний размер равен  $10^{-5} \text{ м}$ , их плотность –  $8,8 \times 10^9 \text{ м}^{-3}$ , а проводимость –  $1,0 \times 10^5 \text{ См/м}$  [2].

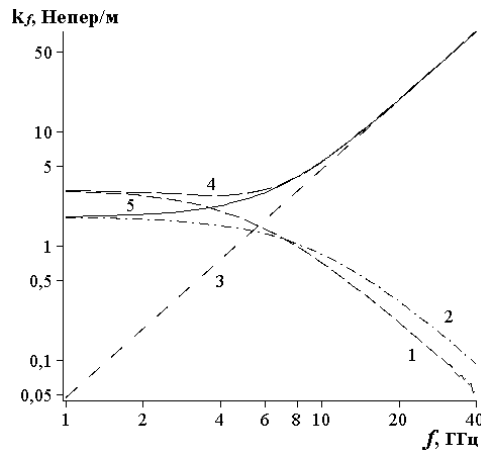


Рис. 1. Коэффициенты погонного ослабления СВЧ излучения в пламенах пожаров сосновых лесов  
 $1 - k_{je}$  для  $\nu = 3.43 \times 10^{10} \text{ c}^{-1}$ ,  $2 - k_{je}$  для  $\nu = 5.97 \times 10^{10} \text{ c}^{-1}$ ,  $3 - k_{jp}$ ,  $4 - k_{je} + k_{jp}$  для  $\nu = 3.43 \times 10^{10} \text{ c}^{-1}$ ,  $5 - k_{je} + k_{jp}$  для  $\nu = 5.97 \times 10^{10} \text{ c}^{-1}$

Результаты расчетов показывают, что ослабление СВЧ излучения от взаимодействия со свободными электронами уменьшается во всем исследованном СВЧ диапазоне ( $1 \div 40 \text{ ГГц}$ ) для обоих предельных значений частоты столкновений –  $3,43 \times 10^{10} \text{ c}^{-1}$  и  $5,97 \times 10^{10} \text{ c}^{-1}$ . Ослабление СВЧ излучения от взаимодействия с углеродными частицами в указанном СВЧ диапазоне увеличивается. Суммарное ослабление несколько уменьшается в диапазоне  $1 \div 4 \text{ ГГц}$ , а затем существенно увеличивается в области, где поглощение от углеродных частиц становится преобладающим, а именно в диапазоне  $8 \div 40 \text{ ГГц}$ . Частота столкновений электронов оказывает влияние на результаты только в диапазоне  $1 \div 6 \text{ ГГц}$ , а в диапазоне  $10 \div 40 \text{ ГГц}$  ее изменением можно пренебречь.

Излучательная способность пламени в СВЧ диапазоне рассчитывается с помощью соотношения (4). Результаты этих оценок для пламени пожаров в сосновых лесах представлены на рис. 2. Следует отметить, что излучательная способность пламени высотой  $2 \div 3 \text{ м}$  так близка к 1 (отклонение не превышает 0,5 %) во всем исследованном СВЧ диапазоне, что для оценочных расчетов она может быть принята равной 1.

Для оценок наблюдаемых радиоярких температур используются соотношения (6) и (11). В расчетах принято  $T_0 = 300 \text{ К}$ , что характерно для летнего сезона засухи с высокими рисками стихийных бедствий, и  $T_1 = 1000 \text{ К}$ , что близко к средним значениям для пожаров в сосновых лесах [1, 2].

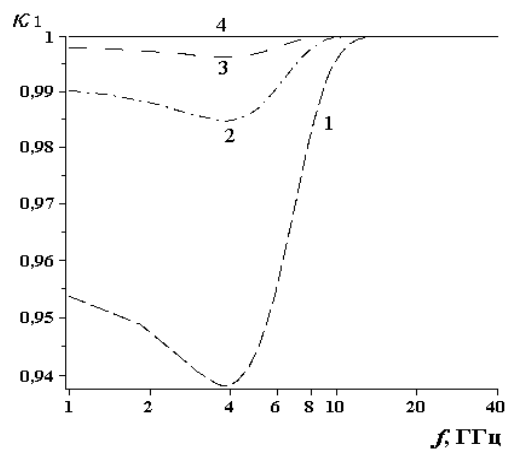


Рис. 2. Излучательная способность пламени в пожарах сосновых лесов  $k_1$  для  $\nu = 3.43 \times 10^{10} \text{ c}^{-1}$ . 1 -  $h_f = 1 \text{ м}$ , 2 -  $h_f = 1.5 \text{ м}$ , 3 -  $h_f = 2 \text{ м}$ , 4 -  $h_f = 5 \text{ м}$

На рис.3 представлены результаты расчетов радиояркой температуры пламени (6) с учетом (11). Анализ результатов на рис. 3, показывает, что для обнаружения лесных пожаров с деревьями высотой менее 5 м (т.е. фактически для кустарников) можно использовать весь исследованный СВЧ диапазон от 1 до 40 ГГц в то время, как для зрелого леса с деревьями выше 20 м, можно использовать только радиометры диапазона 1 ÷ 8 ГГц.

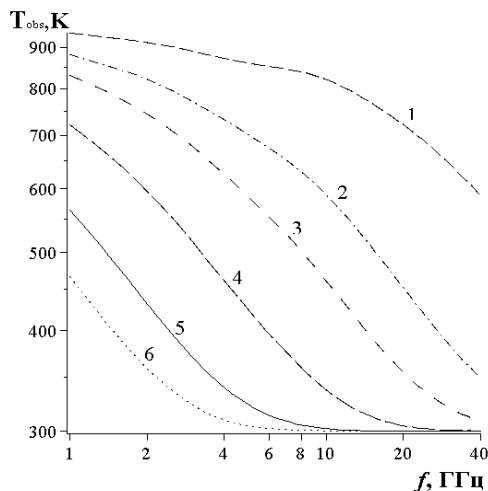


Рис. 3. Наблюдаемые радиояркие температуры пожаров в сосновых лесах. 1 -  $H_t = 1$  м, 2 -  $H_t = 3$  м, 3 -  $H_t = 5$  м, 4 -  $H_t = 10$  м, 5 -  $H_t = 20$  м, 6 -  $H_t = 30$  м

На рис. 4 показаны оценки минимальных площадей возгораний в сосновых лесах, которые могут быть обнаружены СВЧ радиометрическими приемниками с флюктуационной чувствительностью 1 К и апертурой антенны 2 м. Моделированы наблюдения с высоты 100 м. Оптимальные диапазоны частот, позволяющие обнаруживать лесные пожары минимальных размеров, описывается следующим эмпирическим выражением:

$$f_{opt} = 1,48 \times 10^2 H_t^{-1.25} \quad (16)$$

где  $H_t$  это средняя высота деревьев в метрах.

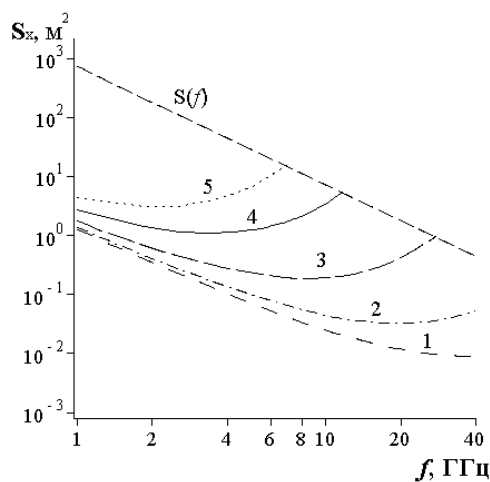


Рис. 4. Минимальный размер площади обнаружения пожара. 1 -  $H_t = 3$  м, 2 -  $H_t = 5$  м, 3 -  $H_t = 10$  м, 4 -  $H_t = 20$  м, 5 -  $H_t = 30$  м

Учитывая соотношения (14), (15) минимальный размер обнаруживаемых пожаров на оптимальной частоте (16) можно оценить следующим образом:

$$S_{\min} = 2 \times 10^{-7} \frac{\Delta_T A^2}{d^2} H_t^{2.53}. \quad (17)$$

### Выводы

1. Исследование моделируемого радиотеплового излучения лесных пожаров в сантиметровом/дециметровом СВЧ диапазоне (1 ÷ 40 ГГц) показывает, что в нем можно выделить 3 спектральные полосы (см. рис. 1–4) а именно: 1 ÷ 4, 4 ÷ 15, 16 ÷ 40 ГГц, с отчетливо различающимися характеристиками.
2. Модельные зависимости радиоярких температур лесных пожаров в СВЧ диапазоне 1 ÷ 4 ГГц позволяют заключить, что этот диапазон является наиболее подходящим для выявления ранней стадии пожаров для зрелых лесов с высотой деревьев, достигающей 20 ÷ 30 м. Учитывая то, что СВЧ антенны в этом диапазоне имеют малое разрешение, можно констатировать, что для раннего обнаружения очагов возгорания в зрелых лесах необходимо проводить мониторинг на малых высотах полета около 100 ÷ 200 м. В этом случае мы имеем возможности обнаруживать лесные пожары с площадями менее 10 м<sup>2</sup>.
3. Модельные зависимости радиоярких температур лесных пожаров в СВЧ диапазоне 4 ÷ 15 ГГц позволяет заключить, что этот диапазон является наиболее подходящим для выявления ранней стадии пожаров для молодых лесов с высотой деревьев порядка 5 ÷ 20 м. Для раннего обнаружения очагов возгорания в молодых лесах необходимо проводить мониторинг на малых высотах полета 200 ÷ 300 м. В этом случае имеется возможность обнаруживать лесные пожары с площадями 1 ÷ 5 м<sup>2</sup>.
4. Модельные зависимости радиоярких температур лесных пожаров в СВЧ диапазоне 15 ÷ 40 ГГц позволяет заключить, что этот диапазон является наиболее подходящим для выявления ранней стадии пожаров для кустарников с высотой до 5 м. В этом случае для раннего обнаружения очагов возгорания необходимо проводить мониторинг на малых высотах полета 300 ÷ 500 м. В этом случае мы имеем возможности обнаруживать лесные пожары с площадями менее 1 м<sup>2</sup>.
5. Выполненный анализ позволяет установить оптимальные частоты зондирования для лесного полога заданной высоты (см. таб. 1).

Таблица 1. Оптимальные частоты для обнаружения лесных пожаров

Средняя высота деревьев, м	Оптимальная частота, ГГц
3	37.1
5	19.6
10	8.61
20	3.45
30	2.07

Контроль лесов на этих частотах позволяет обнаруживать очаги возгорания минимального (при прочих равных условиях) размера. Эти оптимальные частоты зависят только от высоты лесного покрова и не зависят от параметров наблюдения  $A$ ,  $\Delta_T$  и  $d$  (см. выше выражения (14), (15) и (16)).

6. Построены эмпирические зависимости, позволяющие оценить оптимальную частоту (16) для обнаружения пожара минимальной площади (17) в СВЧ диапазоне 1 ÷ 40 ГГц.



7. Анализ модельных расчетов позволил установить, что высота наблюдения не должна превышать 300 м (оптимально 100 ÷ 200 м). При больших высотах (более 300 м) минимальная площадь обнаруженного пожара в плотных зрелых лесах имеет размер более 30 м<sup>2</sup>, что, по нашему мнению, не является ранней стадией пожара.
8. Обобщающим выводом проведенного анализа являются рекомендуемые характеристики мобильного микроволнового радиометрического комплекса, который должен включать:
  - 3 СВЧ радиометра, которые позволяют исследовать все три вышеупомянутые группы лесов и имеют хорошо развитую технологическую основу, а именно радиометры диапазонов:
    - 1,43 ГГц (21 см),
    - 13,3 ГГц (2,25 см),
    - 37,5 ГГц (0,8 см),
  - Антенная система с апертурой 1÷2 м.
9. Мониторинг с целью раннего обнаружения пожаров должен проводиться с высот:
  - 100 ÷ 200 м для плотных (зрелых) лесов с деревьями высотой 20 ÷ 30 метров;
  - 200 ÷ 300 м для молодых лесов с деревьями высотой 5 ÷ 20 метров;
  - 300 ÷ 500 м для молодых лесов и кустарниковых пустошей высотой менее 5 метров.

### Литература

1. *Бородин Л.Ф., Кирдяшев К.П., Стаканкин Ю.П., Чухланцев А.А.* Применение СВЧ радиометрии для обнаружения лесных пожаров // Радиотехника и электроника, 1976, 21(9), 1945–1950 с.
2. *Башаринов А.Е., Бугаев В.А., Поляков В.М. и др.* Микроволновое излучение низкотемпературной плазмы // Сов. Радио: Москва, 1974, 21–22 с. 208–216.
3. *Никольский В.В.* Электродинамика и распространение радиоволн. 1974. 452 с.
4. *Чухланцев А.А., Шутко А.М.* Ослабление электромагнитного излучения растительным покровом // Радиотехника и электроника, 2003, 48(11), 1285–1311 с.
5. *Kgakgamatso Mphale, Mohan Jakob, Mal.Heron,* Prediction and Measurements of Electron Density and Collision Frequency in a Weakly Ionized Pine Fire // International Journal of Infrared and Millimeter Waves, 2007, p 28, 251–262.

### Microwave radiometric model of forest fire hearth

**V. Savorskiy, V. Kaevitser, I. Kibardina, S. Maklakov, O. Panova, A. Chukhlantsev**

*Kotelnikov's Institute of Radioengineering and Electronics RAS, Fryazino Department,  
141190, Fryazino, Moscow region, Vvedenskogo sq., 1  
E-mail: savor@ire.rssi.ru*

Large scale drought in European part of Russia in 2010 summer caused disastrous forest and peat fires. It revived and intensified research and design works in developing effective instruments for early detection of fireplaces in forest and in peat bog environment which is typical for European Russia. Some of these works are based on experience that is originated from airborne exploration of forest and peat fires in Moscow region in 1972 conducted by authors' institutions. Presented work is aimed in scientific justification of application of airborne microwave complex which should enable early detection of forest and peat fires occurred in Russian forest conditions. To this end we developed model that describes features of fire observations from aircraft or helicopter based on microwave (MW) radiometric measurements in centimeter/decimeter waveband. This model allows us to study features of fire thermal radiation in MW band. As a result we can judge what MW radiometer allows us to detect fire in its early stage when it is covered by vegetation canopy. Based on these conclusions the design recommendations of MW radiometric complex are provided.

**Keywords:** forest fire, early detection, microwave radiometry, airborne, model.