

Развитие СВЧ-радиометрической модели очага пламени лесного пожара

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

*Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, Фрязинский филиал
Фрязино, Московская обл., Россия
E-mail: savor@ire.rssi.ru*

Для анализа возможности обнаружения пожаров с помощью СВЧ-радиометров, установленных на летательных аппаратах, в работе развита модель очага пламени лесного пожара. Эта модель позволяет оценить значения радиоярких температур пламен низовых лесных пожаров с учетом изменений их термодинамических температур. В рамках развитой модели установлено, что основными параметрами пламен, определяющими значения наблюдаемых радиоярких температур, являются электронная плотность и частота столкновений электронов. Они полностью определяют параметры собственного СВЧ-излучения лесных пламен, представляющих собой низкотемпературную слабоионизованную плазму. При моделировании условий наблюдения низовых пожаров сквозь лесной полог определены оптимальные СВЧ диапазоны для раннего обнаружения очагов лесных пожаров.

Ключевые слова: СВЧ-радиометрия, лесные пожары, модель излучения, радиотепловое излучение.

Введение

В данной работе представлена уточненная модель, описывающая особенности наблюдения лесных пожаров с самолета или вертолета с применением СВЧ-радиометрического комплекса сантиметрового / дециметрового диапазонов. В основу положен методологический подход, развитый в работе (Саворский и др., 2012). Уточненная модель позволяет оценить значения радиоярких температур пламен низовых лесных пожаров с учетом изменений их термодинамических температур. Уточнение модели обусловлено учетом температурной зависимости процессов ионизации в пламенах низовых лесных пожаров, обогащенных ионами калия. В рамках развитой модели установлено, что основными параметрами пламен, определяющими значения наблюдаемых радиоярких температур, являются электронная плотность и частота столкновений электронов. Они полностью определяют параметры собственного СВЧ-излучения лесных пламен, представляющих собой низкотемпературную слабоионизованную плазму. Следствием этого является возможность уточнения оценок наблюдаемых при возникновении лесного пожара радиоконтрастов в диапазоне 1–40 ГГц. Важно, что в рамках развиваемого подхода также представляется возможным установить оптимальные частоты СВЧ зондирования ранних стадий лесных пожаров, т.е. те частоты, на которых минимизируется размер очага возгорания.

Основные соотношения

Яркая температура излучения лесных пожаров в СВЧ-диапазоне рассмотрена в постановке (Саворский и др., 2012), направленной на изучение возможности раннего обнаружения лесных пожаров с аэрокосмических носителей. При этом очаги пламени

на ранних стадиях развития пожара закрыты от наблюдателя кронами деревьев. В этой постановке в пожароопасном сезоне температура древесных крон равна температуре поверхности земли T_0 , а наблюдаемая в сантиметровом-дециметровом и СВЧ-диапазонах радиояркая температура T_{obs} может быть описана следующим соотношением:

$$T_{obs} \approx T_0 + (1 - \exp(-\alpha_1))\exp(-\alpha_2)(T_1 - T_0), \quad (1)$$

где T_1 – термодинамическая температура лесного пожара; α_1, α_2 – полные коэффициенты ослабления излучения лесного пожара и крон деревьев. Излучательные способности пламени и полога леса, соответственно, равны $\kappa_1 = 1 - \exp(-\alpha_1)$, $\kappa_2 = 1 - \exp(-\alpha_2)$.

Пламя лесного пожара представляет собой низкотемпературную плазму, что определяет особенности поглощения в этой среде (Саворский и др., 2012; Башаринов и др., 1974)

$$\alpha_1 = (k_{fe} + k_{fc})h_f, \quad (2)$$

где k_{fe} – погонное поглощение, вызванное взаимодействием СВЧ излучения со свободными электронами; k_{fc} – погонное поглощение, вызванное поглощением в углеродных частицах пламени; h_f – высота пламени. Погонное ослабление на частоте ω , вызванное взаимодействиями с электронами, равно

$$k_{fe} = \frac{2\omega}{c} \sqrt{\frac{1}{2} \left(1 - \frac{\omega_0^2}{\omega^2 + \nu^2} \right)} \left[\sqrt{1 + \frac{\nu^2 \omega_0^2}{\omega^2 (\omega^2 + \nu^2 - \omega_0^2)}} - 1 \right], \quad (3)$$

где ω_0 – плазменная частота; ν – частота столкновений электронов; c – скорость света в вакууме. Плазменная частота равна

$$\omega_0^2 = N_e e^2 / \epsilon_0 m,$$

где N_e – плотность электронов; e – заряд электрона; m – масса электрона; ϵ_0 – диэлектрическая проницаемость вакуума. Поглощение СВЧ излучения в углеродных частицах пламени равно (Башаринов и др., 1974)

$$k_{fc} [M^{-1}] = N_c \frac{\omega^2 [\text{сек}^{-1}] a^3 [M]}{c^2 [M/\text{сек}]} \left(\frac{1}{10 \sigma [C/M]} + 16 \pi^2 a^2 [M] \right), \quad (4)$$

где N_c – плотность углеродных частиц; σ – проводимость углеродных частиц, a – радиус углеродных частиц, c – скорость света. Плотность углеродных частиц можно определить из весовой концентрации углеродных частиц Q :

$$N_c = 3Q / 4\pi a^3 \rho,$$

где ρ – плотность углеродных частиц.

Из выражений (3), (4) видно, что для расчета погонного ослабления в пламени необходимо определить электронную плотность N_e , частоту столкновений электронов ν , плотность N_c и радиус углеродных частиц a . Согласно работе (Heron et al., 2004) по степени поглощения радиоволн пламени лесного пожара можно разбить на четыре группы: по содержанию калия («низкое» и «высокое» его содержание) и по интенсивности пожара («низкая» интенсивность пожара с термодинамической температурой около 1075 К и «высокая»

интенсивность с термодинамической температурой до 1300 К). При «низком» содержании калия (около 0,1%) затухание для радиоволн диапазона 25 МГц÷10 ГГц практически не зависит от интенсивности пожара и составляет 0,6÷0,8 дБ/м. При «высоком» содержании калия (2,6%) затухание составляет 16÷20 дБ/м. Это указывает на то, что содержание калия и степень его ионизации играют значительную роль в формировании радиотеплового излучения лесного пожара, определяя концентрацию и частоту соударения электронов. К сожалению, в настоящее время не существует модельных представлений о размерах и концентрации углеродных частиц пламен лесных пожаров. Поэтому в расчетах мы исходили из того, что эти параметры близки к параметрам так называемого молодого дыма лесного пожара. Поэтому, исходя из статистических характеристик, приведенных в обзоре (Raid et al., 2005), в работе были приняты следующие диапазоны изменчивости облака углеродных частиц пламени: $Q = 4 \div 5 \cdot 10^{-5}$ кг/м³, $a = 0,5 \div 5 \cdot 10^{-6}$ м (Raid et al., 2005).

В равновесном состоянии параметры плазмы однозначно определяются его температурой. При этом концентрация заряженных частиц описывается уравнением Саха с константой равновесия K_1 , равной (Frost, 1961)

$$K_1 = \frac{N_i N_e}{N_0} = 2 \frac{P_i}{P_0} \left(\frac{2\pi M_e kT}{h^2} \right)^{3/2} \exp\left(\frac{-eV_i}{kT} \right), \quad (5)$$

где T – термодинамическая температура; V_i – потенциал ионизации; P_i, P_0 – статистические веса; индексы $i, e, 0$ – означают ионы, электроны и нейтральные атомы; k – постоянная Больцмана, h – постоянная Планка. Для щелочных металлов $P_i/P_0 = 1/2$ (Frost, 1961).

В состав золы, образующейся при горении, входят главным образом соли щелочноземельных металлов. В золе из древесины сосны, ели и березы содержится свыше 40% солей кальция, свыше 20% солей калия и натрия и до 10% солей магния (Heron et al., 2004). Для калия (K), кальция (Ca), магния (Mg) потенциалы ионизации равны соответственно 4,34 eV; 6,11 eV; 7,64 eV. Плотность электронов в образующемся при горении указанных пород пламени определяется следующим соотношением (Frost, 1961):

$$N_e = (K_1 N_p)^{1/2} \left[\left(1 + \frac{K_1}{4N_p} \right)^{1/2} - \left(\frac{K_1}{4N_p} \right)^{1/2} \right], \quad (6)$$

где N_e – электронная плотность пламени, а $N_p = N_0 + N_i$ – общее число атомов калия, равная согласно (Frost, 1961)

$$N_p [\text{м}^{-3}] = 7,35 \times 10^{27} p [\text{атм}] / T [\text{K}], \quad (7)$$

где p – парциальное давление калия в смеси газов в атмосферах.

Температурные зависимости электронной плотности и частоты столкновения электронов в пламенах лесных пожаров

Результаты расчетов электронной плотности в зависимости от температуры в соответствии с соотношениями (5) – (7) для пламен, обогащенных калием, приведены на *рис. 1*. Здесь треугольником представлены значения электронной плотности, полученные при

экспериментальных измерениях прохождения радиоволн диапазона $8 \div 10,5$ ГГц через пламя горящих сосновых игл (Mphale et al., 2007), а кружками – электронная плотность, полученная при математическом моделировании пламени эвкалиптового леса (Voan, 2009). Анализ показывает, что электронная плотность $0,51 \div 1,35 \cdot 10^{16} \text{ м}^{-3}$ при температуре 1080 К (Mphale et al., 2007) достигается при парциальных давлениях атомов калия в пламени, превышающих 1 атм, т.е. такие электронные концентрации нефизичны. Поэтому при проведении дальнейших расчетов мы принимали парциальное давление калия в пламени равным 0,005 атм. Как видно из рис. 1, при таком значении парциального давления калия расчетные значения электронной плотности близки к данным моделирования (Voan, 2009).

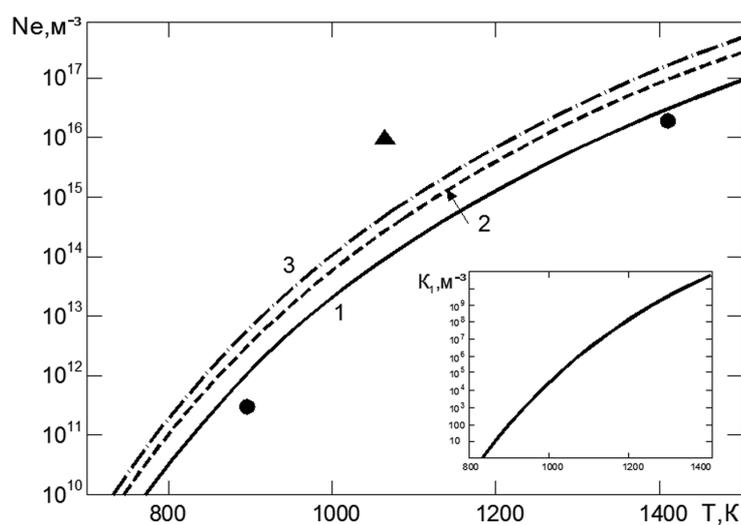


Рис. 1. Электронная плотность в зависимости от температуры для различных парциальных давлений калия p :
 1 – 0,005 атм; 2 – 0,05 атм; 3 – 0,15 атм.
 ▲ – (Mphale et al., 2007), ● – (Voan, 2009).

Частоту столкновений можно рассчитать из соотношения (Smith et al., 2007)

$$\nu = Pd^2 \left\{ \frac{\pi}{2kM_e T} \right\}^{1/2}, \quad (8)$$

где P – давление воздуха, равное 1 атм, d – диаметр молекул воздуха $0,2 \div 0,3$ нм. Из соотношения (8) следует, что с увеличением температуры частота столкновений уменьшается. Эксперимент, выполненный в (Mphale et al., 2007), также подтверждает, что частота столкновений уменьшается с ростом температуры. Однако в работе (Voan, 2009) на базе моделирования пламени с помощью пакета FDS (Fire Dynamics Simulator), который реализует вычислительную гидродинамическую модель теплопереноса при горении, численно решает уравнения Навье – Стокса для низкоскоростных температурно-зависимых потоков, было показано, что частота столкновений с ростом температуры в пламени растет, что является следствием природы самого пламени как термодинамически неравновесного процесса горения. По результатам работы (Voan, 2009) она может быть аппроксимирована следующим выражением в диапазоне температур $650 \div 1000$ К

$$\nu = 10^{11} (0,0069T - 0,63). \quad (9)$$

Результаты расчета частоты столкновений электронов для (8) и (9) и результаты эксперимента (Mphale et al., 2007) приведены на *рис. 2*.

Как видно из *рис. 2*, результаты эксперимента (Mphale et al., 2007) и расчет по формуле (8) при условии, что размер молекул принят равным $d = 0,2$ нм, хорошо соответствуют друг другу (кривые 1, 2). В области температур >1000 К частоты столкновений, вычисленные теоретически и при моделировании в (Voan, 2009), отличаются на порядок (кривые 2, 4).

Поглощение в углеродных частицах в соответствии с выражением (4) вычислим по параметрам, задаваемым характеристиками, близкими к показателям для молодого лесного дыма, т.е. с $Q = 4 \div 5 \cdot 10^{-5}$ кг/м³ и $a = 0,5 \div 5 \cdot 10^{-6}$ м (Raid et al., 2005). Как показывают расчеты, такая концентрация углеродных частиц практически не оказывает влияния на излучательную способность пламени в диапазоне частот $1 \div 40$ ГГц. На *рис. 3* приведены результаты расчетов частотной зависимости излучательной способности пламени высотой 3 м по модели, представленной соотношениями (2) – (9). Расчеты выполнены для трех характерных температур пламени, а именно для 1100 К, 1200 К, 1300 К. Заштрихованные области показывают возможный диапазон изменений излучательной способности для заданной температуры; при этом нижняя граница диапазона – это расчет для модели частоты столкновений (9), а верхняя – для расчета частоты столкновений по модели (8). В работе (Саворский и др., 2012) излучательная способность пламени была принята равной 1 при высоте пламени более 3 м. При этом параметры содержания дыма взяты из работы (Башаринов и др., 1974), где рассматривалось горение углеводородного топлива, параметры которого давали более высокие значения излучательной способности пламени на частотах выше

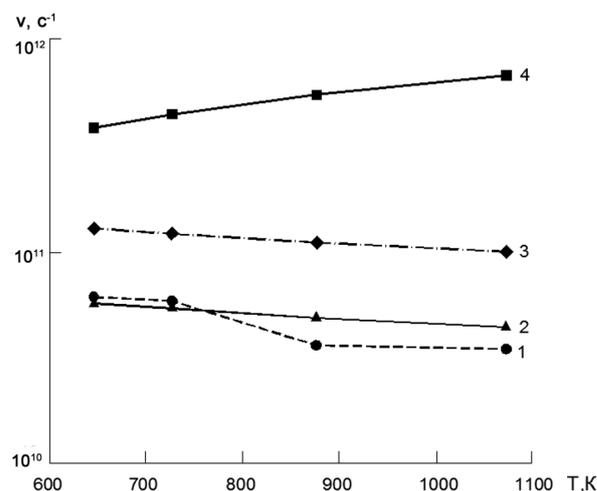


Рис. 2. Частота столкновений в пламени в зависимости от температуры. 1 – результат эксперимента (Mphale et al., 2007); 2 – результат расчета по (8), $d = 0,2$ нм; 3 – результат расчета по (8), $d = 0,3$ нм; 4 – результат моделирования пламени лесного пожара (Voan, 2009).

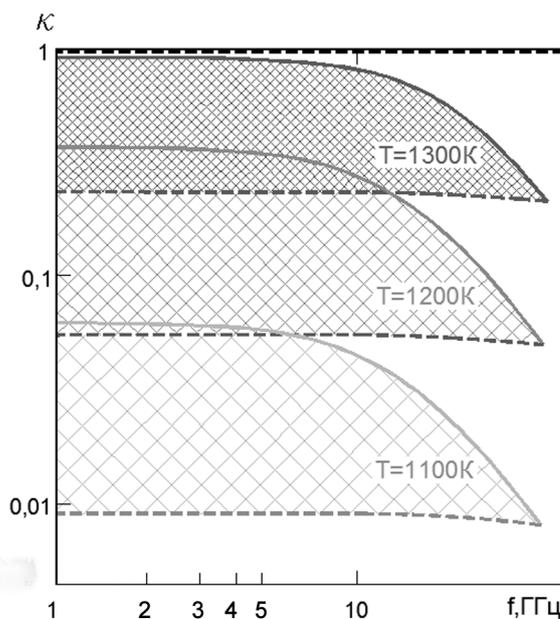


Рис. 3. Частотная зависимость излучательной способности пламени высотой 3 м. Нижняя граница – расчет для модели частоты столкновений (9), верхняя – для модели (8)

10 ГГц, поскольку плотность углеродных частиц составляла $N_c = 8,8 \cdot 10^9 \text{ м}^{-3}$, а их радиус $a = 5 \cdot 10^{-5} \text{ м}$.

Проведенные в рамках данной работы расчеты показали, что в диапазоне частот 1÷40 ГГц вклад углеродных частиц в излучательную способность лесных пламен пренебрежимо мал. В результате расчетов установлено также, что значения излучательной способности пламен лесных пожаров резко (практически на два порядка) увеличиваются в диапазоне температур от 1000 до 1200 К. Значительной, как установлено, является и частотная зависимость излучательной способности лесных пламен (рис. 3). Как следует из проведенного анализа, излучательную способность пламени на частотах выше 1 ГГц можно принять для упрощения расчетов равной 1 лишь при температурах существенно выше 1300 К в диапазоне 1÷10 ГГц.

Результаты моделирования яркостной температуры лесного пожара

Радиояркостную температуру лесного пожара можно определить, используя соотношения (2), (3), описывающие перенос СВЧ-излучения в трехслойной среде с учетом температурной зависимости плотности электронов и частоты их столкновений (4) – (9).

Поглощение в растительном покрове может быть представлено в следующем виде (Чухланцев и др., 2003):

$$a_2 = k_t H_t = A f^\beta H_t,$$

где f в МГц; $A = 8 \cdot 10^{-4}$; $\beta = 0,8$; H_t – высота кроны. Частотные зависимости радиояркостных температур пламени высотой 3 м, экранируемого кроной высотой 2 м, представлены на рис. 4.

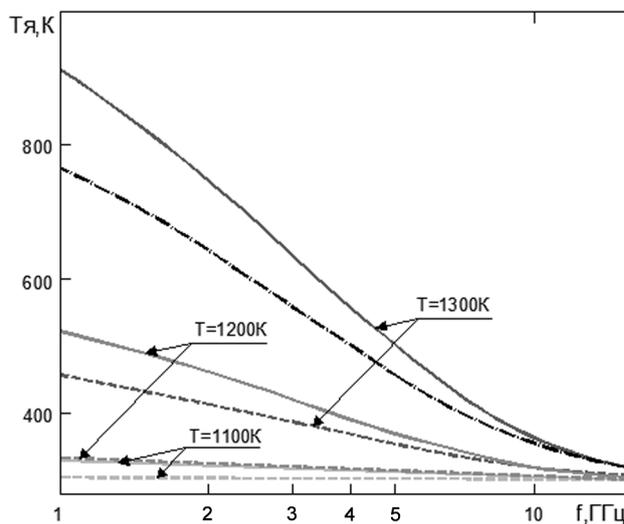


Рис. 4. Частотная зависимость яркостных температур лесного пожара с высотой пламени 3 м, экранируемого кронами деревьев высотой 2 м. Сплошные линии – расчет по модели (8), пунктир – по модели (9). Штрих-пунктир – результат расчета по модели работы (Саворский и др., 2012) при $T = 1000 \text{ К}$

Из рис. 4 видно, что учет температурной зависимости параметров плазмы приводит к уменьшению оценки яркостной температуры очага пожара по сравнению с результатами

работы (Саворский и др., 2012). Расчеты показывают также, что наблюдаемые яркостные температуры пламени при его температуре ниже 1200 К будут существенно отличаться от его термодинамической температуры при высоте пламени менее $8 \div 10$ м даже в отсутствие экранирующего влияния кроны, так как при этих условиях слой пламени в СВЧ диапазоне является полупрозрачным для электромагнитного излучения (рис. 3).

Расчетные оценки показывают, что крона существенно уменьшает яркостную температуру на частотах выше 8 ГГц уже при высоте кроны 2 м. На рис. 5 приведены результаты расчетов частотной зависимости яркостной температуры пожара для высот крон 1, 3 и 5 м, высота пламени – 3 м. Штрих-пунктир – результат расчета по модели (Саворский и др., 2012), сплошные линии – расчеты по модели (8), а пунктирные линии – по модели (9).

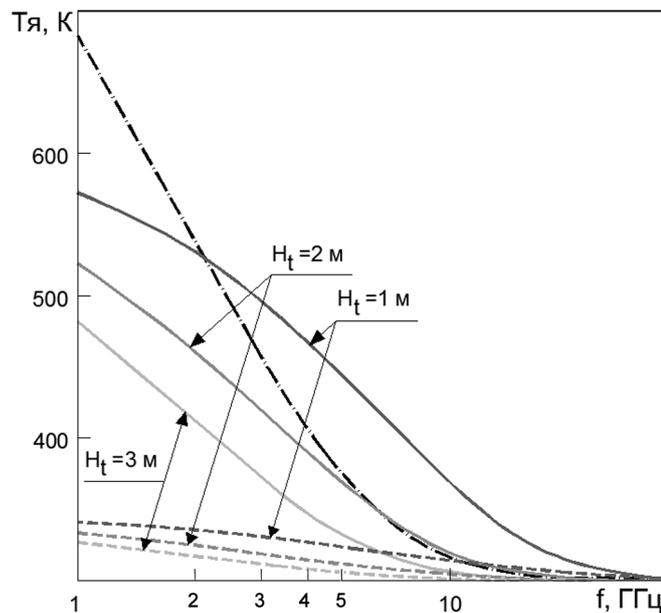


Рис. 5. Частотная зависимость яркостной температуры очага лесного пожара с температурой 1200 К и высотой пламени 3 м при различной высоте кроны. Сплошные линии – расчет по модели (8), пунктир – по модели (9). Штрих-пунктир – результат расчета по модели из (Саворский и др., 2012) при $T = 1000$ К

Из рис. 5 следует, что в зависимости от выбранной модели яркостная температура пожара может меняться на десятки или сотни градусов для заданной температуры и частоты, при этом модель (Саворский и др., 2012) (штрихпунктирная линия) дает завышенные значения радиояркостной температуры очага пожара для температуры пламени 1000 К в СВЧ диапазоне выше 10 ГГц.

Оценку минимального обнаруживаемого размера пожара выполним по методике, предложенной в работе (Саворский и др., 2012) для радиометрического приемника с флуктуационной чувствительностью ΔT и апертурой антенны d . В этом случае для минимального обнаруживаемого размера площади огня S_x имеем

$$S_x = S \cdot \Delta T / (T_{obs} - T_0),$$

где $S = \pi(H \cdot c / fd)^2$ – площадь пятна антенны на поверхности земли.

Результаты расчета частотной зависимости S_x при условии наблюдений СВЧ радиометром с высоты $H = 100$ м при флуктуационной чувствительности приемника $\Delta T = 1$ К и апертуре антенны $d = 2$ м показаны на *рис. 6*. Расчет S_x выполнен для области пожара высотой 3 м с температурой 1100 К (*рис. 6а*) и 1200 К (*рис. 6б*) и высотами экранирующих крон 1, 3 и 5 м. На *рис. 6* заштрихованные области показывают границы S_x , вычисленные с учетом различной частотной зависимости частоты столкновений в плазме. Пунктиром приведены результаты расчета для модели из работы (Саворский и др., 2012) для высот крон 1, 3 и 5 м.

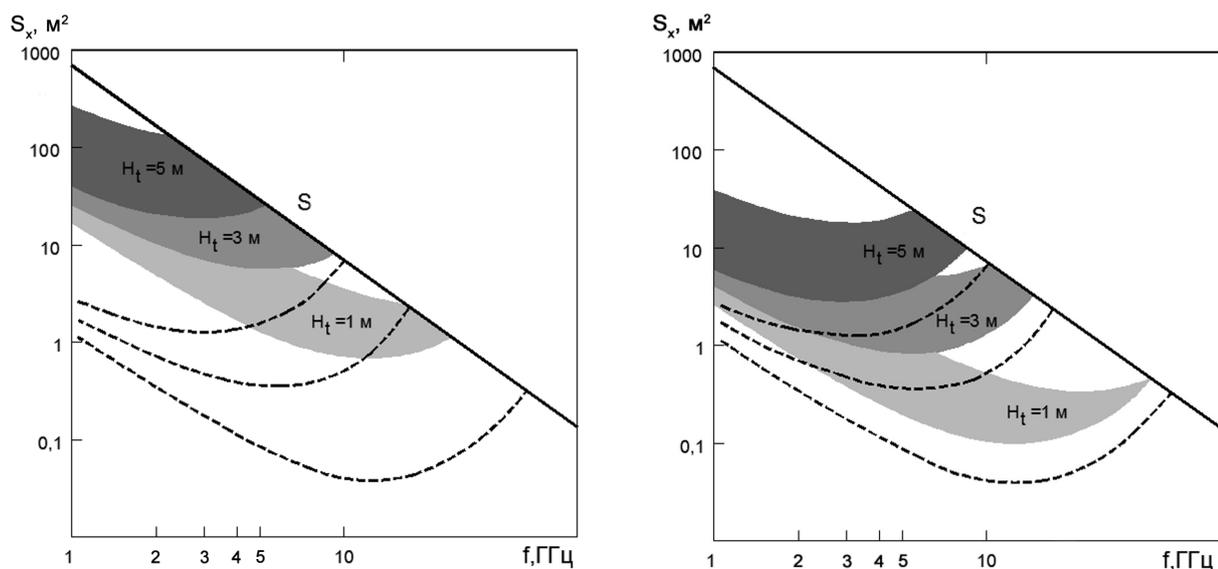


Рис. 6. Минимальная обнаруживаемая площадь пожара а) при температуре 1100 К, б) при температуре 1200 К. Высота пламени – 3 м. Пунктир – расчет по модели (Саворский и др., 2012). Верхняя граница каждой из заштрихованных областей – расчет по модели (9), нижняя – по модели (8)

Минимальная обнаруживаемая площадь горения, как видно из *рис. 6*, существенно больше, чем по оценкам работы (Саворский и др., 2012). При этом оптимальные частоты измерения температуры пожара под пологом из работы (Саворский и др., 2012) практически совпадают с минимальной оценкой для используемых в данной работе моделей. Как показывает анализ, оптимальные частоты для определения пожара для радиометров, размещенных на аппаратах на высоте 100 м, лежат в области $2 \div 20$ ГГц и определяются, преимущественно, высотой крон. Это подтверждают представленные на *рис. 7* зависимости f_{opt} от высоты кроны для различных термодинамических температур пламен. Отметим, что для заданных температур оптимальные частоты при высоте кроны более двух метров практически совпадают и могут быть аппроксимированы степенной зависимостью

$$f_{opt} = 14,35 / H_t, \quad (11)$$

или в приближении более высокого порядка точности

$$f_{opt} = 14,35 / H_t^\gamma, \quad \gamma = 0,99 \pm 0,04, \quad (12)$$

где H_t в метрах, f_{opt} в ГГц. Соотношение (11) показано на *рис. 7* пунктиром.

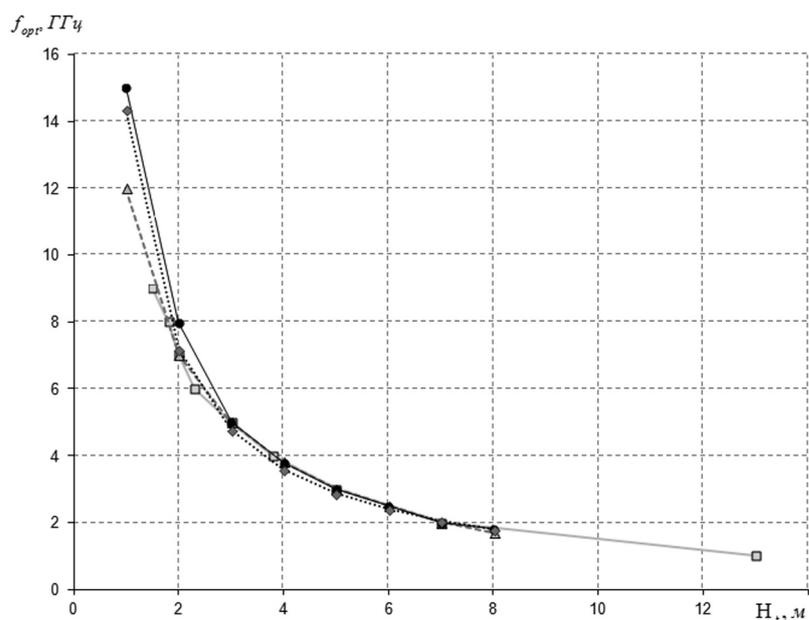


Рис. 7. Оптимальная частота определения лесного пожара в зависимости от высоты кроны для температур 1100 К, 1200 К, 1300 К. Точечная линия – (11)

Выводы

1. Учет температурной зависимости частоты столкновений и электронной плотности в пламени при лесном пожаре показывает, что излучательную способность пламени можно считать близкой к единице только при температурах выше 1300 К.

2. Наблюдаемые яркостные температуры пламени при температурах ниже 1200 К существенно отличаются от соответствующих им термодинамических температур при высоте пламени менее 8÷10 м.

3. Высота кроны в СВЧ диапазоне 1÷40 ГГц является основным определяющим фактором для выбора оптимальной частоты зондирования в целях обнаружения очагов лесных пожаров, задавая минимальную, практически не зависящую от прочих факторов площадь обнаруживаемого очага низового пожара.

4. Модель, предложенная в (Саворский и др., 2012) и не учитывающая температурную зависимость характеристик пламен низовых лесных пожаров, дает завышенную оценку величин наблюдаемых при возникновении низового пожара радиоярких контрастов, но при этом позволяет оценивать оптимальные частоты СВЧ радиометрических зондировщиков, используемых для обнаружения высокотемпературных (с температурой пламени > 1200 К) лесных низовых пожаров с приемлемой для практических приложений точностью.

Литература

1. Башаринов А.Е., Бугаев В.А., Зотова Е.Н., Лукинов И.Н., Поляков В.М., Тестов В.Г. СВЧ-излучение низкотемпературной плазмы // М.: Сов. радио, 1974. С. 21–22, 208–216.
2. Саворский В.П., Каевицер В.И., Кибардина И.Н., Маклаков С.М., Панова О.Ю., Чухланцев А.А. СВЧ-радиометрическая модель очага возгорания лесного пожара // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2012. Т. 9. № 1. С. 137–144.
3. Чухланцев А.А., Шутко А.М. Ослабление электромагнитного излучения растительным покровом // Радиотехника и электроника. 2003. 48(11). 1285–1311.
4. Boan J.A. Radio propagation in fire environments, Thesis submitted for the degree of doctor of philosophy, University of Adelaide, Australia, 2009.
5. Frost L.S. Conductivity of Seeded Atmospheric Pressure Plasmas // J. of Applied Physics. Vol. 32. No.10. October 1961. P. 2029–2036.
6. Heron M.L., Mphile K. Radio wave attenuation in bushfires, tropical cyclones and other severe atmospheric conditions // Final report on EMA Project 60/2001, James Cook University, Australia. 2004. <http://www.em.gov.au/Documents/EMA%20Project%2010-2001.PDF>.
7. Mphale K., Jacob M., Heron M. Prediction and measurement of electron density and collision frequency in a weakly ionized pine fire // Int.J. Infrared Milli Waves, 2007. Vol. 28, P. 251–262.
8. Reid J.S., Koppmann R., Eck T.F., Eleuterio D.P. A review of biomass burning emissions part II: intensive physical properties of biomass burning particles // Atmos. Chem. Phys. 5, 799–825, 2005.
9. Smith H. and T.M. Sugden, Studies on the ionization produced by metallic salts in flames // Proceedings of royal Society of London, Series A, 211(1104), 1952.
10. <http://fds-smv.ru/> Пакет FDS (Fire Dynamics Simulator).

Advanced microwave radiometric model of forest fire flames

I.N. Kibardina, V.P. Savorskiy, O.O. Kuznetsov, S.M. Maklakov,
O.Yu. Panova, A.A. Chukhlantsev

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

A model of forest fire flames which is aimed to analyze the possibility of fire detection using air or space bourn microwave radiometers is developed. The model allows estimating the values of forest fire flame brightness temperatures, taking into account changes in their thermodynamic temperatures. In the frame of the developed model it was found that the main parameters of flames that determine the values of the observed brightness temperatures, are electron density and electron collision frequency. They fully define the parameters of microwave emission of forest flames representing the low-temperature weakly ionized plasma. When simulating the conditions of surface-through-forest-canopy fire observations the optimal microwave bands for early detection of forest fires were determined.

Keywords: microwave radiometry, forest fires, emission model, radiothermal emission.