

В.Г. Астафуров

ОСОБЕННОСТИ ОБНАРУЖЕНИЯ ОЧАГОВ ЛЕСНЫХ ПОЖАРОВ
ПРИ РАЗОРВАННОЙ ОБЛАЧНОСТИИнститут оптики атмосферы СО РАН, Томск
Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники

Поступила в редакцию 27.11.98 г.

Принята к печати 27.11.98 г.

С помощью метода численного моделирования продолжено исследование статистических характеристик регистрируемой радиометром мощности восходящего ИК-излучения очага пожара и фона в спектральных интервалах 3,55–3,93 и 10,3–11,3 мкм. Основное внимание уделено плотности вероятности регистрируемой мощности и ее аппроксимации. На основе критерия Неймана–Пирсона и замкнутого численного эксперимента найдены оценки вероятности обнаружения очагов пожаров различных размеров. Полученные результаты иллюстрируют эффективность предложенного подхода.

Введение

Решение проблемы раннего обнаружения очагов лесных пожаров позволит существенно сократить число больших пожаров и снизить затраты на борьбу с ними. В [1] отмечается, что за последние годы в России наблюдается тенденция роста площади лесного фонда, пройденной огнем. Только в 1998 г. в Хабаровском крае около 2 млн. га леса пострадало от пожаров, а на Сахалине – десятки тысяч гектаров. Рост числа пожаров связан прежде всего с увеличением антропогенной нагрузки в Западной Сибири, Красноярском крае, Прибайкалье и на Дальнем Востоке. Антропогенные причины составляют около 80% всех возгораний [2]. С грозами, в зависимости от региона, связано возникновение от 20 до 30% пожаров.

Для обнаружения лесных пожаров можно использовать различные информативные признаки: повышенную температуру, выбросы в атмосферу газообразных продуктов горения (H_2 , CO, CO_2 , CH_4 , C_2H_2 , непредельные углеводороды), дымовые шлейфы и потерю цветности участков местности, охваченных лесным пожаром [2, 3]. Применение многоканальных радиометров на спутниках позволяет оперативно получать информацию об облачном поле, состоянии атмосферы и подстилающей поверхности (ПП) в глобальном масштабе. В частности, измерение температуры ПП по восходящему инфракрасному (ИК) излучению дает возможность выделять участки высокотемпературных аномалий, появление которых может быть вызвано лесными пожарами. В работе [4] утверждается, что, регистрируя ИК-излучение в спектральном интервале 3,55–3,93 мкм с помощью радиометра высокого разрешения AVHRR [5], установленного на метеорологическом спутнике NOAA, можно обнаруживать очаги пожаров (ОП) размером 10x10 м и с температурой $T \sim 800$ К или зоны «тления» размером 30x30 м и с $T \sim 500$ К.

Предлагаемая работа является продолжением ранее начатых исследований по обнаружению ОП в условиях облачной атмосферы [6]. Дело в том, что повторяемость условий ясного неба на территории Сибири и Дальнего Востока по данным [7] составляет только 10–20% в марте – мае и около 10% в июле–августе. Средний балл облачно-

сти в этих регионах в марте – мае изменяется от 4 до 5, а в июле – августе он равен 6. При этом средняя повторяемость облачности 1–4 балла в марте–мае составляет 28% и 25 в июне – июле. Для облачности 5–7 баллов эти значения равны 26 и 35%, а для 8–10 баллов лежат в пределах 10–20 и 30–40% соответственно. Кроме того, практически каждый пятый пожар обусловлен грозой, т.е. его возникновение и развитие связаны с наличием облаков. Из сказанного следует, что в общем случае задачу обнаружения ОП надо решать для условий облачной атмосферы. Причем наибольший интерес представляют часто встречающиеся умеренные значения балла облачности, лежащие в интервале от 1 до 7.

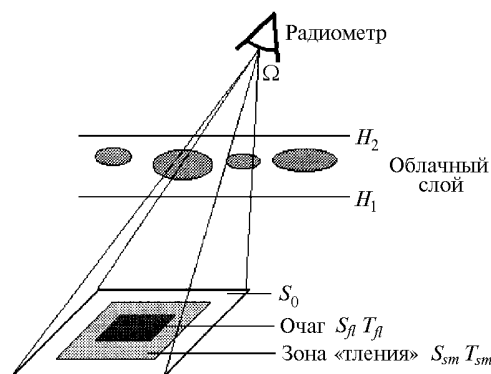


Рис. 1. Схема обнаружения очагов пожаров в условиях разорванной облачности

Постановка задачи и метод решения

На рис. 1 приведена схема обнаружения ОП с помощью ИК-радиометра, расположенного на высоте H_0 . Возможность обнаружения ОП в условиях разорванной облачности связана с существованием в поле зрения оптического приемника просветов между облаками и наличием участков с малой оптической толщиной. Следуя [8], определим понятие разорванной облачности как поле кучевых облаков со стохастической геометрией и детерминированной внутренней структурой. Облачный слой ограничен

интервалом высот $[H_1, H_2]$, в пределах которого суммарный коэффициент ослабления на высоте z равен

$$\alpha_{\Sigma}(z, \lambda) = \alpha(z, \lambda) + \chi(\mathbf{r}) \alpha_c(\lambda). \quad (1)$$

Здесь $\alpha(z, \lambda)$ – коэффициент аэрозольного и газового ослабления; $\alpha_c(\lambda)$ – коэффициент ослабления облака; $\chi(\mathbf{r})$ – индикаторное поле:

$$\chi(\mathbf{r}) = 1, \mathbf{r} \in \Theta \text{ и } \chi(\mathbf{r}) = 0, \mathbf{r} \notin \Theta,$$

Θ – случайное множество точек, в которых присутствует облачное вещество. Величина регистрируемой радиометром мощности в спектральном интервале $\Delta\lambda$ определяется выражением

$$p(\xi, \Delta\lambda) = \int_{\Omega} d\omega \int_{S_R^*} dp \int_{\Delta\lambda} d\lambda k(\lambda) I(\mathbf{p}, \omega, \lambda), \quad (2)$$

где ξ – угол визирования; S_R^* – поверхность приемной апертуры радиометра с площадью S_R ; Ω – угол поля зрения радиометра; $k(\lambda)$ – коэффициент пропускания оптического фильтра на длине волны λ ; $I(\mathbf{p}, \omega, \lambda)$ – интенсивность восходящей тепловой радиации в точке $\mathbf{p} \in S_R^*$ в направлении единичного вектора ω . Как и в [6], облака считаются нерассеивающими, ПП характеризуется распределением температуры $T_s(x, y)$ и излучательной способностью $\varepsilon[\lambda, T_s(x, y)]$.

Интенсивность восходящей тепловой радиации на высоте H_0 равна [9]:

$$I(\mathbf{p}, \omega, \lambda) = \varepsilon(\lambda, T_s(x, y)) B_{\lambda}(T_s(x, y)) \exp\left(-\frac{1}{\mu} \int_0^{H_0} \alpha_{\Sigma}(s, \lambda) ds\right) + \int_0^{H_0} B_{\lambda}(T(z)) \exp\left(-\frac{1}{\mu} \int_z^{H_0} \alpha_{\Sigma}(s, \lambda) ds\right) \frac{\alpha_{\Sigma}(z, \lambda)}{\mu} dz, \quad (3)$$

где $B_{\lambda}(T_s)$ – функция Планка; $\mu = \cos \xi$; $x = x(\omega, H_0)$; $y = y(\omega, H_0)$; $T(z)$ – температура на высоте z . В (3) не учитывается отраженное от ПП солнечное излучение, хотя его величина может быть значительной в спектральном интервале 3,55–3,93 мкм в случае сильно отражающей растительности [10]. Определим радиационную температуру T_R как решение уравнения

$$p(\xi, \Delta\lambda)/(\Omega S_R) = \int_{\Delta\lambda} B(T_R, \lambda) d\lambda. \quad (4)$$

Из (4) видно, что T_R характеризует некоторую среднюю температуру участка ПП, находящегося в поле зрения радиометра, с учетом искажающего влияния облачной атмосферы.

Исследование флуктуаций ИК-излучения ОП и фона, регистрируемых радиометром, является основой для построения статистических критериев обнаружения пожаров. В условиях облачной атмосферы можно выделить следующие источники флуктуаций мощности $p(\xi, \Delta\lambda)$: флуктуации суммарного коэффициента ослабления $\alpha_{\Sigma}(z, \lambda)$; флуктуации температуры атмосферы $T(z)$ и ПП $T_s(x, y)$; флуктуации излучательной способности ПП $\varepsilon(\lambda, T_s(x, y))$. Однако в данной работе, как и в [6], учитываются только флуктуации $\alpha_{\Sigma}(z, \lambda)$, которые обусловлены стохастической

геометрией облачного поля (второе слагаемое в выражении (3)) и являются определяющими. Рассмотрение остальных составляющих, перечисленных выше, выходит за рамки данной работы.

Статистические характеристики $p(\xi, \Delta\lambda)$ и T_R находятся методом численного моделирования, который подробно изложен в [6]. Величина $\alpha_c(\lambda)$ соответствует модельному облаку C_1 . Реализации облачного поля генерируются с помощью пуассоновского потока точек в пространстве, которые соответствуют центрам оснований облаков, расположенных на высоте $H_1 = 1$ км. Облака аппроксимируются опрокинутыми усеченными параболами вращения. Высота облака равна диаметру его основания и является случайной величиной с экспоненциальной функцией распределения [8]. Для каждой реализации облачного поля определяются величина мощности $p(\xi, \Delta\lambda)$ и соответствующее ей значение радиационной температуры T_R из уравнения (4).

Результаты расчетов и их обсуждение

Появление ОП в поле зрения радиометра приводит к увеличению радиационной температуры T_R на $\langle \Delta T_R \rangle$, величина которого зависит от распределения температуры в очаге и поглощения ИК-излучения в рассматриваемом спектральном интервале. При расчетах используется простейшая модель ОП, состоящая из двух зон (рис. 1) – зоны тления с постоянной температурой T_{sm} и площадью S_{sm} , в которой закончились интенсивные процессы горения, и собственно очага пожара, имеющего более высокую температуру T_{fl} и площадь S_{fl} . Вне очага температура ПП равна T_0 . Относительные размеры зон ОП определяются двумя параметрами:

$$d_1 = S_{sm}/S_0, \quad d_2 = S_{fl}/S_0,$$

где S_0 – полная площадь участка земной поверхности, лежащая в поле зрения радиометра. Все расчеты проводились для $H_0 = 850$ км, $\Omega = 1,88 \cdot 10^{-6}$ ср, $\xi = 0$, $T_{fl} = 1000$ К, $T_{sm} = 300$ К, $\varepsilon = 1$, спектральных интервалов 3,55–3,93 и 10,3–11,3 мкм, лежащих в окнах прозрачности и соответствующих 3-му и 4-му каналам радиометра высокого разрешения AVHRR спутника NOAA [5]. Первый спектральный интервал совпадает с областью максимального излучения подстилающей поверхности при характерных температурах лесных пожаров 800–1000 К. В другом расположен максимум излучения подстилающей поверхности, что позволяет устранить шумы, обусловленные влиянием неоднородностей земной поверхности [3]. Высотные профили аэрозольного коэффициента поглощения взяты из [11]. Расчеты функции пропускания, обусловленные молекулярным поглощением в выбранных спектральных интервалах, были проведены для лета средних широт по методике, описанной в [12]. Программы для расчетов были любезно предоставлены К.М. Фирсовым.

Радиометр дает возможность измерять температуру ПП с пространственным разрешением S_0 (при зондировании в надир $S_0 \approx 1$ км), поэтому ОП с заданным распределением температуры фактически ставится в соответствие некоторая эквивалентная температура T^* всего участка ПП в поле зрения радиометра. Зависимости T^* от величины относительного размера зоны «тления» d_1 при фиксированных размерах зоны «горения» и условий ясного неба приведены на рис. 2.

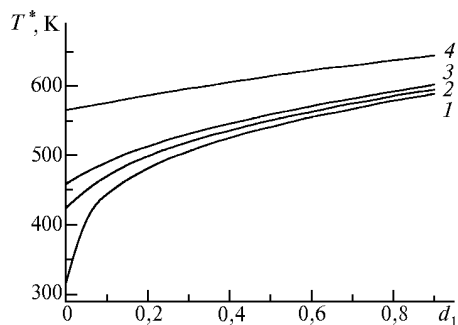


Рис. 2. Зависимости эквивалентной температуры подстилающей поверхности T^* от величины относительного размера «зоны тления» для спектрального интервала 3,55–3,93 мкм и нескольких размеров «зоны горения»: 1 – $d_2 = 10^{-4}$; 2 – $d_2 = 0,005$; 3 – $d_2 = 10^{-2}$; 4 – $d_2 = 0,05$

Полученные результаты иллюстрируют высокую чувствительность приемника ИК-излучения в спектральном интервале 3,55–3,93 мкм к высокотемпературным аномалиям на ПП. Например, очаг размером 100 м^2 и температурой 1000 К приводит к изменению T^* от 300 до 315 К. К недостаткам радиометра AVHRR следует отнести наличие у него порога насыщения, который в зависимости от модификации изменяется от 322 (NOAA-7) до 331 К (NOAA-10) [3]. Это существенно ограничивает возможности AVHRR при определении размеров ОП и обнаружении их на фоне больших помех. На рис. 3 показаны зависимости величины среднего приращения радиационной температуры $\langle \Delta T_R \rangle$ и относительного среднеквадратического отклонения $\delta_T = \sqrt{D(T_R)} / \langle \Delta T_R \rangle$ от балла облачности N . Уменьшение $\langle \Delta T_R \rangle$ с ростом N обусловлено увеличением вероятности экранирования ОП облаками. Результаты расчетов зависимостей моментов $p(\xi, \Delta\lambda)$ от балла облачности и их обсуждение приведены в [6].

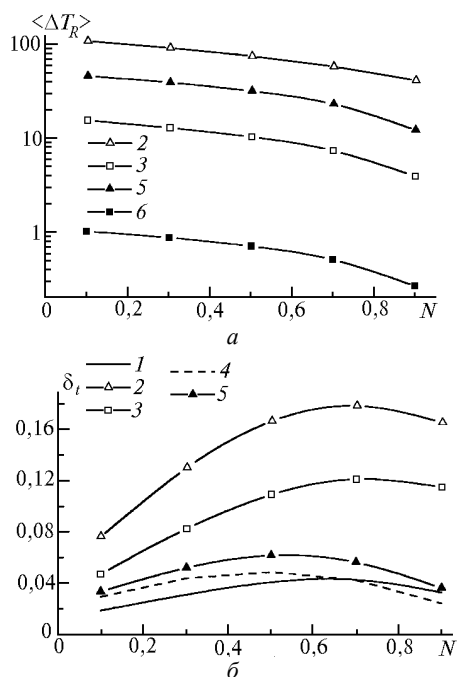


Рис. 3. Зависимости $\langle \Delta T_R \rangle$ (а) и относительного среднеквадратического отклонения температуры δ_T (б) от балла облачности N для спектральных интервалов 3,55–2,93 мкм (кривые 1, 2, 3) и 10,3–11,3 мкм (кривые 4, 5, 6); кривые 1, 4 – $d_1 = 0$, $d_2 = 0$ (ОП отсутствует); 2, 5 – $d_1 = 2,4 \cdot 10^{-2}$, $d_2 = 2,5 \cdot 10^{-3}$; 3, 6 – $d_1 = 0$, $d_2 = 6,3 \cdot 10^{-4}$

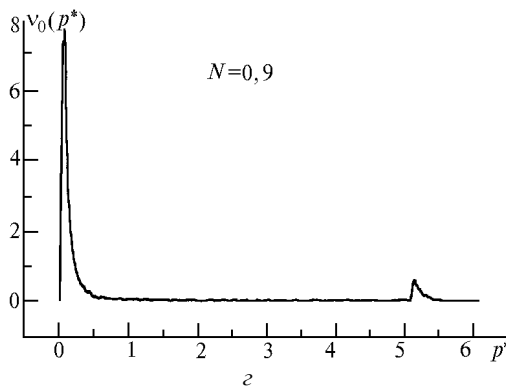
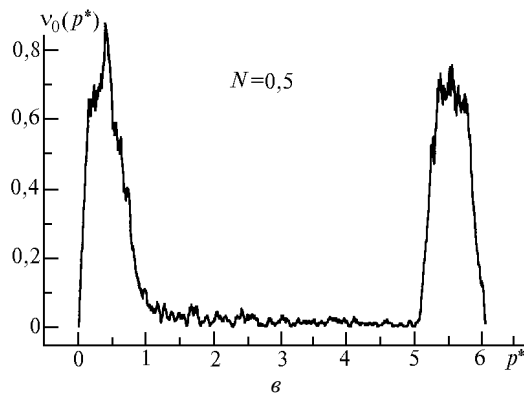
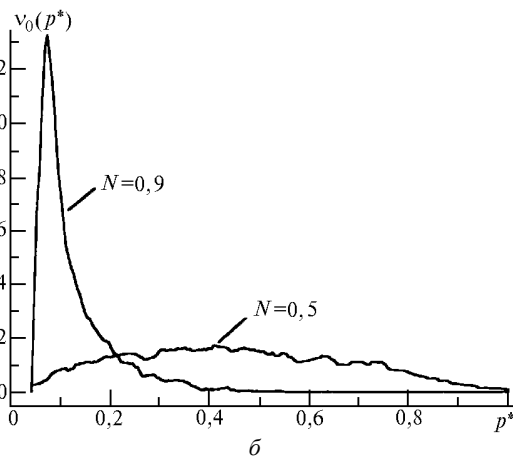
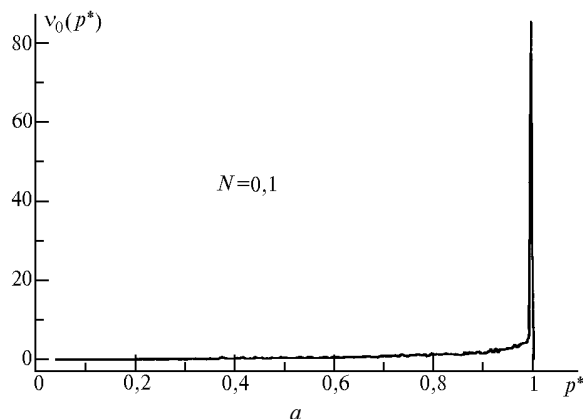


Рис. 4. Гистограммы нормированной мощности фона (а, б), фона и излучения ОП с относительными размерами $d_1 = 0$, $d_2 = 6,3 \cdot 10^{-4}$ (в, г) в спектральном интервале 3,55–3,93 мкм

Наиболее полной статистической характеристикой $p(\xi, \Delta\lambda)$ является плотность вероятности $f(p)$. На рис. 4 приведены результаты расчета гистограмм $v(p^*)$. Величина $p^* = p(\xi, \Delta\lambda)/p_0(\xi, \Delta\lambda)$, $p_0(\xi, \Delta\lambda)$ – регистрируемая мощность в условиях безоблачной атмосферы при температуре ПП $T_s = T_0$. Очевидно, что при отсутствии ОП и балле облачности $N = 0$, $f_0(p) = \delta(1 - p/p_0)$, где $\delta(x)$ – дельта-функция.

В случае сплошной облачности, полностью экранирующей ПП, $f_0(p) = \delta(1 - p/p_{\min})$. Здесь p_{\min} – минимальная регистрируемая мощность восходящего ИК-излучения атмосферы, находящейся выше облачного слоя. Показанные на рис. 4,а,б гистограммы $v_0(p^*)$ иллюстрируют промежуточную ситуацию. Причем при $N = 0,5$ «ширина» гистограммы является максимальной, что связано с наибольшей дисперсией мощности ИК-излучения.

При наличии ОП в поле зрения радиометра $v_0(p^*)$ становится бимодальной (рис. 4,в,г). Первая вершина $v_0(p^*)$ при $p^* < 1$ связана с излучением участка ПП с температурой T_0 , а вторая обусловлена высокотемпературной аномалией. На основе полученных результатов можно сделать вывод о том, что предложенную нами ранее [6] аппроксимацию плотности вероятности $f(p)$ гамма-распределением можно использовать только при отсутствии ОП в поле зрения радиометра.

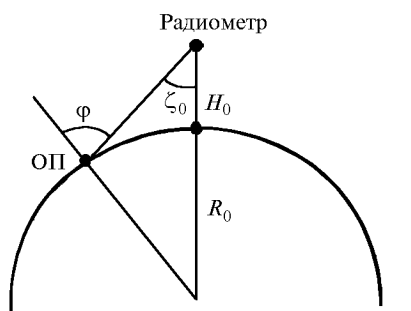


Рис. 5. Определение геометрических параметров: ξ_0 – угол визирования точечного ОП; φ – зенитный угол

Рассмотрим случай точечного ОП и получим приближенное выражение для плотности вероятности $f(p)$. Регистрируемая радиометром суммарная мощность $p = p_{s,a} + p_{fl}$, где $p_{s,a}$ и p_{fl} – мощности ИК-излучения атмосферы, участка ПП с $T_s = T_0$ и ОП соответственно. Будем считать ОП точечным, а облака не имеющими оптически тонких краев. Направление на ОП в поле зрения радиометра зададим единичным вектором \mathbf{l} . С вероятностью $n(\mathbf{l})$ это направление закрыто облаками. Для изотропного облачного поля эта вероятность равна $n(\xi_0)$, где ξ_0 – угол между линией визирования ОП и направлением в надир (рис. 5). Очевидно, что при $\xi_0 = 0$ вероятность закрытия линии визирования $n(0) = N$. Так как $\Omega \ll 1$, то $\xi \approx \xi_0$. Плотность вероятности $f_1(p_{fl})$ равна

$$f_1(p_{fl}) = n(\xi) \delta(p_{fl}) + (1 - n(\xi)) \delta(p_{fl} - p_{j0}),$$

где p_{j0} – регистрируемая мощность от ОП в условиях безоблачной атмосферы. Пусть $f_2(p_{s,a})$ – плотность вероятности $p_{s,a}$ в условиях облачной атмосферы. Считая $p_{s,a}$ и p_{fl} независимыми, найдем свертку $f_1(p_{fl})$ и $f_2(p_{s,a})$:

$$f(p) = n(\xi) f_2(p) + (1 - n(\xi)) f_2(p - p_{j0}).$$

Из полученного выражения видно, что $f(p)$ имеет две вершины, соотношение между которыми определяется веро-

ятностью $n(\xi)$, а их форма одинакова и имеет вид $f_2(p)$. Некоторое отличие формы вершин $v(p^*)$ на рис. 4,в можно объяснить нарушением сделанного предположения о независимости $p_{s,a}$ и p_{fl} , которое связано с частичным экранированием ОП и ПП одним и тем же облаком.

Если для $f_2(p)$ использовать аппроксимацию гамма-распределением, то плотность вероятности

$$f(p) = \frac{\exp(-p/\eta)}{G(v+1) \eta^{v+1}} \{n(\xi) p^v - h(p - p_{j0}) (1 - n(\xi)) (p - p_{j0})^v \times \\ \times \exp(-p_{j0}/\eta)\},$$

$\Gamma(x)$ – гамма-функция; $h(x)$ – функция единичного скачка:

$$h(x) = \begin{cases} 1, & x \geq 0, \\ 0, & x < 0; \end{cases}$$

параметры v и η определяются выражениями:

$$v = \frac{\langle p_{s,a} \rangle}{D(p_{s,a})} - 1, \quad \eta = \frac{D(p_{s,a})}{\langle p_{s,a} \rangle}.$$

Зависимости средней мощности $\langle p_{s,a} \rangle$ и дисперсии $D(p_{s,a})$ от балла облачности N при $\xi = 0$ приведены в [6].

Вероятность закрытия линии визирования облаками $n(\varphi)$ в зависимости от зенитного угла ОП (см. рис. 5) для различных моделей облачного поля рассмотрена в [13]. Там же проведен сравнительный анализ полученных результатов. В [14] сравниваются теоретические и экспериментальные зависимости $n(\varphi)$. На основании этого можно сделать вывод, что наиболее приемлемое соотношение для расчета $n(\varphi)$ имеет вид

$$n(\varphi) = N \exp[-N(\Psi(\varphi) - 1)] - \exp[-N(\Psi(\varphi) - 1)] + 1,$$

где

$$\Psi(\varphi) = \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \operatorname{erf} \left[\frac{\operatorname{ctg} \varphi}{\sigma_z' \sqrt{2}} \right] + \frac{\sigma_z'}{\sqrt{2\pi} \operatorname{ctg} \varphi} \exp \left[-\frac{\operatorname{ctg}^2 \varphi}{2 \sigma_z'^2} \right];$$

$\sigma_z'^2$ – дисперсия производной от нормальной случайной поверхности; $\operatorname{erf}(x)$ – интеграл вероятности. В [13] $\sigma_z'^2$ определялась с использованием фотографий небосвода и отмечается ее незначительный рост с повышением балла облачности. В среднем $\sigma_z'^2 = 1,4$. Отмечается также, что, начиная с зенитного угла 50° , $n(\varphi)$ существенно увеличивается. Можно показать, что соотношение между углами ξ и φ , показанными на рис. 5, определяется выражением

$$\varphi = \arcsin [(1 + H_0/R_0) \sin \xi],$$

где R_0 – радиус Земли. Для максимального угла визирования радиометра AVHRR $\xi = 55,4^\circ$ зенитный угол $\varphi = 68,9^\circ$.

Гистограммы $v(p^*)$ можно использовать для вычисления вероятностей обнаружения ОП различных размеров. Для этого был предложен критерий Неймана–Пирсона [6]. Алгоритм обнаружения состоит в сравнении зарегистрированной радиометром мощности $p(\xi, \Delta\lambda)$ с порогом u_{α} , величина которого находится по заданной вероятности ложной тревоги α из уравнения

$$\alpha = \int_0^{u_\alpha} f_0(p) dp,$$

где $f_0(p)$ – плотность вероятности фона, вместо которой при расчетах используется соответствующая оценка $v_0(p^*)$. Величина α характеризует вероятность принятия ошибочного решения о наличии ОП в поле зрения радиометра. Вероятность обнаружения ОП равна

$$1 - \beta = \int_{u_\alpha}^{+\infty} f(p) dp.$$

В таблице для спектрального интервала 3,55–3,93 мкм приведены результаты расчета вероятностей обнаружения различных ОП при $d_1 = 0$. Для $\alpha = 0$ порог $u_\alpha = p_0(\xi, \Delta\lambda)$. В этом случае будут зарегистрированы только те ОП в поле зрения оптического приемника, для которых фиксированная мощность превышает уровень фона $p_0(\xi, \Delta\lambda)$, соответствующий условиям безоблачной атмосферы. В незначительной части ситуаций возможно обнаружение через оптически тонкие кромки облаков. Поэтому для ОП с размерами 25×25 м $1 - \beta = 0,544$ при $N = 0,5$, что превышает вероятность попадания в просветы между облаками, равную 0,5. Задавая даже небольшие α , мы увеличиваем эффективность обнаружения, незначительно проигрывая в его качестве. Особенно это наглядно видно для балла облачности $N = 0,9$.

Вероятность обнаружения по критерию Неймана–Пирсона очагов пожаров с температурой $T_H = 1000$ К

Площадь ОП (размеры ОП)	α	Вероятность обнаружения		
		$N = 0,5$	$N = 0,7$	$N = 0,9$
625 м ² (25 × 25)	0,00	0,544	0,342	0,162
	0,01	0,551	0,362	0,221
	0,02	0,555	0,374	0,241
	0,05	0,565	0,397	0,273
	0,00	0,568	0,386	0,213
1250 м ² (25 × 50)	0,01	0,575	0,407	0,265
	0,02	0,582	0,418	0,283
	0,05	0,591	0,441	0,311
	0,00	0,593	0,420	0,256
	0,01	0,599	0,439	0,309
1875 м ² (25 × 75)	0,02	0,602	0,448	0,325
	0,05	0,611	0,470	0,354
	0,00	0,598	0,430	0,266
	0,01	0,603	0,447	0,319
	0,02	0,608	0,457	0,337
2500 м ² (50 × 50)	0,05	0,618	0,478	0,366

Приведенные выше результаты из-за ряда сделанных приближений носят предварительный характер. Дальней

шие исследования должны быть направлены на построение полной статистической модели фона, учитывающей помеху солнечного излучения, рассеянного облаками, флуктуации температуры и излучательной способности подстилающей поверхности. Фон и излучение ОП, регистрируемые радиометром, имеют совершенно разные спектральные зависимости, поэтому измерения в различных спектральных интервалах должны дать очень важную информацию, использование которой сможет существенно улучшить возможности обнаружения. Результатом этих исследований будут алгоритмы обнаружения ОП на фоне помех в различное время суток по уходящему ИК-излучению с помощью существующих и разрабатываемых радиометров.

Задача обнаружения ОП в условиях облачной атмосферы была сформулирована доктором физико-математических наук Г.А. Титовым. Автор данной статьи благодарен Георгию Александровичу за постоянное внимание к работе и полезные обсуждения полученных результатов. При расчетах используется разработанный им алгоритм моделирования реализаций облачного поля на основе пуассоновского потока точек. Автор выражает также благодарность К.М. Фирсову за предоставленные программы для расчета функций пропускания.

1. Соколовский В.Г. Состояние природной среды в СССР в 1988 г. М.: Госкомприрода СССР, 1989. 203 с.
2. Гришин А.М. Физика лесных пожаров. Томск: Изд-во Том. ун-та, 1994. 218 с.
3. Кондарин Т.В., Овчинникова Е.В. // Исследование Земли из космоса. 1995. N 4. С. 51–57.
4. Kaufman Y.J., Tucker C.J. // J. Geophysical Research. 1990. V. 95. N D7. P. 9927–9939.
5. Lauritsen L., Nelson G.J., Porto F.W. Data extraction and calibration of «Tiros-N»/NOAA Radiometers NESS-107, Technical Memorandum. Washington, D.C., 1979. 58 p.
6. Астафуров В.Г., Титов Г.А. // Оптика атмосферы и океана. 1996. N 5. С. 647–655.
7. Матвеев Ю.Л., Матвеев Л.Т., Солдатенко С.А. Глобальное поле облачности. Л.: Гидрометеиздат, 1986. 280 с.
8. Зуев В.Е., Титов Г.А. Оптика атмосферы и климат. Томск: Изд-во «Спектр», 1996. 271 с.
9. Ку-Нан Лиоу. Основы радиационных процессов в атмосфере. Л.: Гидрометеиздат, 1984. 376 с.
10. Малкевич М.С. Оптические исследования атмосферы со спутников. М.: Наука, 1973. 303 с.
11. Креков Г.М., Рахимов Р.Ф. Оптические модели атмосферного аэрозоля. Томск: Изд-е ТФ СО АН СССР, 1986. 294 с.
12. Фирсов К.М., Чеснокова Т.Ю. // Оптика атмосферы и океана. 1998. N 4. С. 410–415.
13. Авасте О.А., Мулламаа Ю.Р., Нийлиск Х.Ю., Сулев М.А. // Теплообмен в атмосфере. М.: Наука, 1972. С. 134–139.
14. Стохастическая структура полей облачности и радиации / Под ред. Ю.Р. Мулламаа. Тарту: Институт физики и астрономии АН ЭССР, 1972. 282 с.

V.G. Astafurov. Peculiarities of Detection of Forest Fire Sites at Broken Cloudiness.

An investigation of statistical characteristics of the IR-radiation ascending from a fire site and its background detected with a radiometer, is continued by numerical simulation method within spectral ranges 3.55–3.93 and 10.3–11.3 μm. The emphasis is on the probability density of the detectable power and its approximations. Based on the Neyman–Pearson criterion and the closed numerical experiment, the estimates of the probability of finding the forest fire sites of various sizes have been found. The obtained results illustrate an efficiency of the proposed approach.