УДК 528.88

Е. Г. Швецов, А. И. Сухинин

ОЦЕНКА ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ЛЕСНЫХ ПОЖАРОВ ПО ДАННЫМ СПУТНИКОВОЙ СЪЕМКИ*

Выполнена оценка радиационной мощности лесных пожаров, обнаруженных в районе реки Ангары в 2006 г. Представлена методика оценки интенсивности тепловыделения на кромке пожара по измерениям его радиационной мощности. Проведена оценка количества сгоревшей при пожарах биомассы по измерениям радиационной энергии. Рассмотрена возможность определения вида лесного пожара по данным спутниковой съемки.

Ключевые слова: лесные пожары, радиационная мощность, спутниковая съемка.

Основным энергетическим параметром лесного пожара, оцениваемым с использованием данных спутникового дистанционного зондирования, является радиационная мощность пожара. *Радиационная мощность пожара* – это мера скорости выделения пожаром энергии, которое происходит за счет механизма излучения. Радиометр MODIS стал первым сенсором, имеющим 4-микрометровый канал с высоким порогом насыщения, способным давать оценки радиационной мощности пожара [1]. Оценки радиационной мощности, выделяемой в процессе горения, позволяют получить информацию об интенсивности тепловыделения на кромке пожара и количестве растительности, сгорающей в единицу времени [2].

Спутниковые радиометры, работающие в инфракрасном диапазоне, могут выполнять непосредственные измерения тепловой энергии, выделяемой в процессе горения растительности, в виде инфракрасного излучения. При этом каждый пиксель изображения спутникового радиометра будет содержать множество тепловых компонентов, имеющих различную температуру и субпиксельную площадь. Для каждого пожарного пикселя, согласно [3], общее значение радиационной мощности от всех тепловых компонентов (не включая фон) может быть вычислено как

$$\text{FRE}_{\text{true}} = A_{\text{sampl}} \cdot \varepsilon \cdot \sigma \cdot \sum_{i=1}^{n} A_{n} \cdot T_{n}^{4},$$

где FRE_{true} – радиационная мощность пожара, Вт; A_{sampl} – площадь наземной проекции пикселя, м²; ε – излучательная способность; σ – постоянная Стефана– Больцмана, $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8}$ Вт · м⁻² · К⁻⁴; A_n – доля площади *n*-го теплового компонента поверхности в рамках отдельного наземного пикселя; T_n – температура *n*-го теплового компонента, К.

Методика исследования. Авторами была выполнена оценка энергетических параметров, а также оценка количества сгоревшей биомассы для пожаров. Всего рассмотрено 12 пожаров, обнаруженных в период с 9 по 22 июля 2006 г. в районе реки Ангары по данным радиометра MODIS (рис. 1).



Рис. 1. Снимок пожаров, для которых проводилась оценка энергетических параметров (композит видимых каналов радиометра MODIS за 22 июля 2006 г.)

^{*} Работа выполнена при поддержке ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России на 2009–2013 гг.»

При анализе данных из рассмотрения исключались дни, когда пожары были закрыты облаками и не было возможности определить температуру земной поверхности.

При обнаружении пожаров использовался статистический подход. В процессе обнаружения анализировались статистические параметры распределений температуры в 4-микрометровом диапазоне (канал 21 радиометра MODIS) и вычислялось среднее значение температуры и дисперсия в пространственном окне возле потенциального пожарного пикселя. При анализа изображения пожарным считался пиксель, температура которого превышала среднюю температуру пикселей в выборке на величину 2 σ , где σ – дисперсия распределения температуры в канале 21 радиометра MODIS. Таким образом, условие принадлежности пикселя к классу пожаров по данным канала 21 радиометра MODIS может быть записано следующим образом:

$$T_{4\text{fp}} > T_{4\text{avg}} + 2 \cdot \sigma_4$$

где $T_{4\rm fp}$ – температура пожарного пикселя в 4-микрометровом диапазоне; $T_{4\rm avg}$ – среднее значение температуры пикселей в выборке в 4-микрометровом диапазоне; σ_4 – дисперсия распределения температуры выборки в 4-микрометровом диапазоне. Выполнение этого условия дает вероятность принадлежности рассматриваемого пикселя к числу пожарных, равную 0,95.

Радиационная мощность пожара определялась с помощью соотношения между радиационной мощностью, выделяемой пожаром, и разницей температур в 4-микрометровом канале, аппроксимированного в [4]:

$$FRE_{MOD} = 4,34 \cdot 10^{-19} \cdot (T_4^{\ 8} - T_{4b}^{\ 8}).$$

где T_4 – температура пикселя, содержащего активный пожар, в 4-микрометровом диапазоне; T_{4b} – температура фона в 4-микрометровом диапазоне. При этом минимальное и максимальное зарегистрированные значения радиационной энергии пожаров в отдельные дни составили 12 и 4 396 МВт соответственно. Среднее значение этой энергии для рассмотренных пожаров составило 551 МВт. Следует отметить, что большинство пожаров приходилось на пожары, имеющие небольшую мощность. Так, на пожары, радиационная мощность которых не превышала 500 МВт, приходилось почти 65 % от общего числа пожаров.

Оценки радиационной мощности пожаров на 22 июля 2006 г. приведены в табл. 1.

Оценка количества биомассы, сгоревшей при пожаре. Интенсивность реакции горения на единице площади кромки лесного пожара может быть определена следующим образом:

$$I_{\rm r} = B_{\rm f} \cdot \beta \cdot Q/\tau_0,$$

где I_r – интенсивность реакции на единице площади кромки, Вт/м²; B_f – запас горючих материалов, кг/м²; β – полнота сгорания; Q – теплотворная способность топлива, Дж/кг; τ_0 – промежуток времени, в течение которого происходит горение, с.

Таблица 1 Оценки радиационной мощности пожаров на 22 июля 2006 г.

Номер пожара	Среднее значение FRP, MBт/пиксель	Общее значение FRP, MBT	
1	20	205	
2	27	505	
3	20	488	
4	20	564	
5	48	4 396	
6	36	3 556	
7	25	566	
8	107	2 467	
9	52	2 488	
10	34	1 332	
11	83	1 161	
12	19	674	

Известно, что радиационная мощность пожара составляет от 10 до 50 % от общей мощности пожара [5–8]. Тогда при радиационной мощности 40 % можно получить соотношение

$I_{\rm r} \approx 2.5 \cdot {\rm FRE}$,

где FRE – радиационная мощность единицы площади кромки пожара, Вт/м². Таким образом, существует линейная зависимость между скоростью сгорания биомассы при пожаре и радиационной мощностью пожара:

$$B_{\rm f} \cdot \beta = 2.5 \cdot {\rm FRE} \cdot \tau_0/Q.$$

Линейное соотношение между радиационной энергией, выделенной при пожаре, и массой сгоревшего топлива получено и М. Дж. Вустером в результате экспериментальных исследований [9]. Однако спутниковые радиометры способны регистрировать только мгновенные значения скорости выделения радиационной энергии. Это позволяет оценивать лишь мгновенную скорость сгорания биомассы. Для оценки общего количества энергии, выделенной пожаром, а следовательно, и общего количества сгоревшей биомассы необходимо интегрирование мгновенной мощности и скорости сгорания биомассы по времени существования пожара.

Для оценки количества сгоревшей биомассы использовался метод, предложенный в [10]. Применялись следующие соотношения:

$$M_{\text{biomass}} = 0,368(\pm 0,015)$$
FRE,
 $R_{\text{biomass}} = 0,368(\pm 0,015)$ FRP,

где M_{biomass} — количество сгоревшей биомассы, кг; FRE — радиационная энергия, выделенная пожаром, МДж; R_{biomass} — скорость сгорания биомассы, кг/с; FRP — радиационная мощность пожара, МВт.

Для оценки общего количества сгоревшей биомассы необходимо определить общее количество радиационной энергии, выделенной в процессе горения, т. е. проинтегрировать радиационную мощность по времени существования пожара. Однако здесь возникают сложности, связанные с недостаточной частотой получения снимков радиометра MODIS, что сильно затрудняет оценку динамики изменения радиационной мощности пожара. Кроме этого, в те дни, когда исследуемая область была закрыта облаками, снимки пожаров вообще отсутствовали.

Полученные оценки количества сгоревшей биомассы даны в табл. 2.

Номер пожара	Радиационная энергия, ТДж	Масса сгоревшей растительности, тыс. т
1	432,2	159,3
2	369,4	136,1
3	193,4	71,2
4	461,2	169,8
5	622,1	229,0
6	1 376,3	506,3
7	318,3	117,0
8	419,5	154,2
9	473,8	174,3
10	522,3	192,3
11	255,8	94,1
12	729,1	268,0
Всего	6 173,4	2 271,6

Таблица 2 Оценки количества сгоревшей биомассы

Таким образом, для грубой оценки общего количества радиационной энергии, выделенной пожаром, принимались следующие допущения. Мощность пожара в течение суток считалась постоянной и равной мощности на момент прохода спутника и получения снимка. В случае если данные по мощности за какойлибо день отсутствовали, значение мощности аппроксимировалось средним значением за ближайшие дни наблюдений, для которых имелись данные.

Всего в пожарах, рассмотренных в данной статье, было выделено более 6 000 ТДж радиационной энергии и сгорело более 2 млн т биомассы. В то же время вероятно, что данные величины являются завышенными. Снимки MODIS получены в дневное время, когда интенсивность пожаров максимальна. Значение радиационной энергии, полученной в дневное время, распространялось на весь текущий день. Однако известно, что в ночное время интенсивность пожаров существенно ниже, чем днем. Следовательно, общее количество выделенной энергии будет меньше, как и количество сгоревшей биомассы.

Оценка интенсивности тепловыделения на кромке пожара. Согласно определению, предложенному Дж. М. Байрамом [11], интенсивность кромки пожара является произведением запаса горючих материалов, коэффициента полноты сгорания, теплотворной способности топлива и скорости распространения кромки пожара:

$$I_{\rm f} = B_{\rm f} \cdot \beta \cdot Q \cdot U,$$

где $I_{\rm f}$ – интенсивность кромки лесного пожара, Вт/м; $B_{\rm f}$ – запас горючих материалов, кг/м²; β – коэффициент полноты сгорания; Q – теплотворная способность топлива, Дж/кг; U – скорость распространения кромки пожара, м/с.

Оценка интенсивности реакции может быть представлена в виде $I_r = I_f / X_0$, где I_r – интенсивность реакции на кромке лесного пожара, Вт/м²; I_f – интенсивность кромки лесного пожара, Вт/м; X_0 – ширина кромки пожара, м (рис. 2).



Рис. 2. Температурный профиль пожара: стрелкой показано направление ветра; *X*₀ – глубина кромки

Далее, положив $U = X_0 / \tau_0$, где τ_0 – промежуток времени, в течение которого происходит горение, с, интенсивность реакции можно определить как

$$I_{\rm r} = (B_{\rm f} \cdot \beta/\tau_0) \cdot Q \cdot (X_0/X_0).$$

Таким образом можно получить соотношение, связывающее интенсивность реакции на единице площади кромки и выделяемую радиационную мощность (без учета поглощения инфракрасного излучения атмосферой и пологом древостоя): $I_r = 2,5 \cdot FRE$ (здесь предполагается, что доля излучения в общем тепловом балансе пожара составляет 40 %, что учитывается коэффициентом 2,5). Тогда выражение для оценки интенсивности кромки пожара по измерениям его радиационной мощности запишется в виде

$$I_{\rm f} = 2,5 \cdot {\rm FRE} \cdot X_0.$$

Итак, интенсивность тепловыделения в зоне горения определяется как произведение массовой скорости горения на низшую теплотворную способность горючего. Однако при оценке данного параметра дистанционными средствами возникает ряд сложностей. Во-первых, спутниковые радиометры способны регистрировать только лучистую энергию, которая может составлять значительную долю от общей энергии, выделяемой пожаром, однако эта величина изменяется в широких пределах в зависимости от вида пожара. Вовторых, происходит ослабление лучистого потока на пути от пожара до спутника за счет атмосферы и полога древостоя. В-третьих, для оценки интенсивности тепловыделения на кромке пожара требуется информация о геометрических (пространственных) размерах пожара, таких как длина и ширина кромки, получение которых с помощью радиометра низкого пространственного разрешения MODIS является затруднительным.

Оценка площади высокотемпературной зоны пожара и ее температуры выполнялась с помощью биспектрального метода [12]. Полученные на 22 июля 2006 г. параметры пожаров представлены в табл. 3.

Номер пожара	Эффективная температура фронта, К	Эффективная площадь фронта, га	Радиационная мощность фронта, МВт	Длина фронта, км	Эффективная глубина фронта, м	Радиационная интенсивность фронта, кВт/м	Вид пожара
1	599	2,34	170	6	3,9	28	Низовой
2	636	2,87	296	6	4,8	49	Низовой
3	644	3,05	321	9	3,4	36	Низовой
4	607	6,02	463	14	4,3	33	Низовой
5	634	36,31	4 396	39	9,3	113	Верховой
6	623	28,92	2 761	34	8,5	81	Низовой
7	611	6,66	566	10	6,7	57	Низовой
8	696	14,49	2 143	10	14,5	214	Верховой
9	635	16,81	2 403	19	8,8	126	Верховой
10	629	6,66	882	15	4,4	59	Низовой
11	645	7,88	1 161	7	11,2	166	Верховой
12	633	3,80	339	10	3,8	34	Низовой

Параметры пожаров на 22 июля 2006 г.

Таблица 3

Таблица 4

Классы интенсивности кромки пожаров

Класс интенсивности кромки пожара	Интенсивность кромки пожара, кВт/м	Поведение пожара
1	Менее 500	Слабый низовой пожар
2	5002 000	Низовой пожар от низкой до высокой интенсивности
3	2 0004 000	Очень интенсивный низовой пожар
4	Более 4 000	Верховой пожар

Классификация пожаров по мощности тепловыделения на фронте. В основу этой классификации пожаров предлагается положить такую энергетическую характеристику пожара, как мощность излучения кромки. Известно, что в зависимости от вида пожара интенсивность тепловыделения на кромке может меняться в широких пределах [13; 14]. Например, в работе [15] приводится следующая классификация пожаров (табл. 4).

Таким образом, исходя из литературных данных, для классификации использовалось следующее условие: если интенсивность кромки пожара хотя бы на одном участке фронта (в 1 пикселе) превышала 4 000 кВт/м, то пожар считался верховым, все остальные пожары рассматривались как низовые.

Необходимо также отметить, что хотя энергетический признак и является важным при определении вида пожара, другим существенным признаком следует считать скорость распространения кромки пожара. Скорость низовых и верховых пожаров может различаться на порядок величины [13]. Однако для использования данного параметра при дистанционном определении вида пожара нужны сенсоры с высоким пространственным разрешением для более точной оценки положения фронта. Кроме того, важно, чтобы интервал времени повторного наблюдения одного участка земной поверхности был небольшим. В данной статье предложена методика оценки интенсивности кромки пожара по измерениям радиационной энергии пожара, сделанным спутниковыми сенсорами. И хотя в настоящее время точное определение размеров пожара может оказаться затруднительным по причине низкого пространственного разрешения имеющихся радиометров, разработка спутниковых систем, имеющих лучшее пространственное разрешение, позволит проводить подобный анализ.

Выполнена оценка количества биомассы, сгоревшей в пожарах. Однако в силу принятых допущений эта оценка может считаться лишь грубым приближением. Для более точной оценки необходима более точная информация по динамике изменения скорости сгорания биомассы во времени. Это в свою очередь требует наличия спутниковых систем с более высоким временным разрешением по сравнению с радиометром MODIS, т. е. более частого наблюдения одного участка земной поверхности.

Повышение точности оценки интенсивности тепловыделения на кромке пожара также связано с увеличением пространственного разрешения спутниковых радиометров. Это позволит более точно оценивать радиационную мощность пожаров, их геометрические размеры, долю радиационной мощности в общей мощности пожара. Таким образом, измерения радиационной мощности пожара могут дать важную информацию относительно энергетических характеристик пожара, таких как интенсивность его кромки, оценка которой традиционными средствами является затруднительной.

Библиографические ссылки

1. The MODIS fire products / C. Justice, L. Giglio, S. Korontzi, et al. // Remote Sensing of Environment. 2002. Vol. 83. P. 244–262.

2. Relationship between remotely sensed fire intensity and rate of emission of smoke: SCAR-C experiment / Y. Kaufman, L. Remer, R. Ottmar et al. // Global biomass burning. Massachusetts : MIT Press, 1996. P. 685–696.

3. Wooster M. J., Zhukov B., Oertel D. Fire radiative energy for quantitative study of biomass burning: derivation from the BIRD experimental satellite and comparison to MODIS fire products // Remote Sensing of Environment. 2003. Vol. 86. P. 83–107.

4. Kaufman Y. J., Kleidman R., King M. SCAR-B fires in the tropics: properties and remote sensing from EOS-MODIS // J. of Geophysical Research. 1998. Vol. 103. P. 31955–31968.

5. Сухинин А. И. Температурное поле при распространении пламени по хвое // Проблемы лесной пирологии / Ин-т леса и древесины им. В. Н. Сукачева Сиб. отделения АН СССР. Красноярск, 1975. С. 100–127.

6. Гришин М. А., Грузин А. Д., Зверев В. Г. Теплофизика лесных пожаров // Ин-т теплофизики Сиб. отд-ния АН СССР. Новосибирск, 1984. С. 38–75.

7. Ferguson S., Sandberg D., Ottmar R. Modelling the effect of land use changes on global biomass emissions // Biomass Burning and Its Inter-relationship With the Climate System. New York : Springer, 2000. P. 33–50.

8. Валендик Э. Н., Сухинин А. И., Косов И. В. Влияние низовых пожаров на устойчивость хвойных пород / Ин-т леса и древесины им. В. Н. Сукачева Сиб. отделения Рос. акад. наук. Красноярск, 2006.

9. Wooster M. J. Small-scale experimental testing of fire radiative energy for quantifying mass combusted in natural vegetation fires // Geophysical Research Letters. 2002. Vol. 29. P. 21.

10. Retrieval of biomass combustion rates and totals from fire radiative power observations: FRP derivation and calibration relationships between biomass consumption and fire radiative energy release / M. Wooster, G. Roberts, G. Perry, Y. Kaufman // J. of Geophysical Research. 2005. Vol. 110. D24311.

11. Byram G. M. Combustion of forest fuels // Forest Fire: Control and Use. New York : McGraw-Hill, 1959. P. 61–89.

12. Dozier J. A method for satellite identification of surface temperature fields of subpixel resolution // Remote Sensing of Environment. 1981. Vol. 11. P. 221–229.

13. Курбатский Н. П. Техника и тактика тушения лесных пожаров. М. : Гослесбумиздат, 1962.

14. Ryan K. C. Dynamic interactions between forest structure and fire behavior in boreal ecosystems // Silva Fennica. 2002. Vol. 36, № 1. P. 13–39.

15. Variability of fire behavior, fire effects, and emissions in Scotch pine forests of Central Siberia / D. J. McRae, S. G. Conard, G. A. Ivanova, et al. // Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change. 2006. Vol. 11. P. 45–74.

E. G. Shvetsov, A. I. Sukhinin

ASSESSMENT OF FOREST FIRE ENERGY PARAMETERS USING SATELLITE IMAGERY

Radiative power assessment was performed for the fires detected in the Angara region in 2006. Technique for fireline intensity estimation using radiative power measurements is introduced. Rates and totals of biomass combustion were estimated using radiative energy values. Possibility of forest fire type determination using satellite imagery was considered.

Keywords: forest fires, radiative power, satellite imagery.

© Швецов Е. Г., Сухинин А. И., 2011