

Оценка влияния внешних условий на мощность теплоизлучения от лесных пожаров по данным спутникового мониторинга

Е. Г. ШВЕЦОВ, Е. И. ПОНОМАРЕВ

Институт леса им. В. Н. Сукачева СО РАН
660036, Красноярск, Академгородок, 50/28
E-mail: eugeneshvetsov11@yandex.ru

Статья поступила 04.08.2014

Принята к печати 24.10.2014

АННОТАЦИЯ

Исследована зависимость мощности теплоизлучения от лесных пожаров от внешних факторов (преобладающие древостои, напряженность пожароопасного сезона, погодные условия). Вариации мощности теплоизлучения от лесных пожаров восстановлены на основе данных спутникового радиометра MODIS. Установлено, что в периоды высокой горимости значения радиационной мощности пожаров на 10 % выше, чем в периоды низкой горимости. Определен уровень корреляционной связи между радиационной мощностью пожаров и величиной пожарной опасности по условиям погоды. В частности, показатель *FWI* канадской системы оценки пожарной опасности *CFFWIS* показал более тесную связь с радиационной мощностью пожаров в сравнении с российским показателем ПВ-1. Для условий лесной зоны Сибири показано, что пожары, действующие в лесах с преобладанием лиственницы, характеризуются более высокими значениями мощности теплоизлучения (на 20–25 %) в сравнении с пожарами в лиственных лесах и сосняках.

Ключевые слова: спутниковые данные, лесной пожар, радиационная мощность пожара, теплоизлучение, пожарная опасность, корреляционная связь.

На протяжении последних десятилетий проблема лесных пожаров обострилась во многих странах мира, включая Россию. Увеличение числа пожаров и площадей, пройденных огнем, наблюдается в бореальных лесах Сибири [Lourian et al., 2006; Sukhinin, 2008; Пономарев, Швецов, 2013] и Северной Америки [Kasischke, Turetsky, 2006; Kasischke et al., 2010]. Для территории европейской части России наиболее показательна ситуация с массовыми лесными пожарами 2010 г.,

а для Сибири – 2012 г. [Бондур, 2011; Валендик и др., 2014].

В современных условиях использование спутниковых средств для мониторинга пожаров дает возможность ежедневно и многократно наблюдать большие территории, что повышает эффективность обнаружения пожаров и сбора атрибутивных сведений о параметрах горения. Данные, получаемые со спутниковых радиометров в среднем инфракрасном (3–4 мкм) и тепловом (10–12 мкм) диа-

пазонах длин волн, позволяют не только обнаруживать очаги пожаров, но и оценивать количество энергии, выделяемой зоной активного горения. Инструмент MODIS спутников TERRA и AQUA стал первым сенсором, позволяющим проводить оценку мощности теплоизлучения от пожаров в глобальном масштабе [Justice et al., 2002]. Мгновенные значения радиационной мощности (*FRP* – Fire Radiative Power), регистрируемые во время прохождения спутника над очагом активного горения напрямую связаны с интенсивностью кромки и пропорциональны скорости сгорания биомассы [Kaufman et al., 1996; Wooster, 2002]. При этом радиационная энергия (*FRE* – Fire Radiative Energy), выделенная в течение времени существования пожара пропорциональна общему количеству сгоревшей биомассы [Ichoku, Kaufman, 2005; Vermote et al., 2009], а также опосредованно характеризует степень воздействия пожаров на экосистемы.

Количество выделяемого при пожаре тепла определяется, очевидно, количеством сгорающей биомассы. В связи с этим представляет интерес анализ зависимости дистанционно регистрируемой мощности теплоизлучения от влажности горючих материалов, характеризующейся индексами пожарной опасности по условиям погоды. Мы использовали российский и зарубежные индексы [Вонский и др., 1975; Van Wagner, 1987]. Вопрос связи мощности тепловыделения пожара и уровня пожарной опасности для лесной зоны России практически не изучен, в зарубежных публикациях исследования в этой области также единичны [Peterson et al., 2010; Peterson, Wang, 2013].

Цель работы – анализ зависимости радиационной мощности пожаров от физико-географических, лесорастительных и климатических условий лесной зоны России.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

В работе представлены результаты мониторинга радиационной мощности пожаров на территории Сибири за период 2008–2013 гг., выполненного спутниковыми средствами. Исследования проведены для территории 57–67° с. ш., 80–140° в. д., включая зону тайги

(Среднесибирский плоскогорный таежный и Приангарский лесные районы) и зону притундровых лесов и редкостойной тайги (Восточно-Сибирский притундровый район и Восточно-Сибирский таежный мерзлотный район). По данным спутникового мониторинга [Пономарев, Швецов, 2013], территория характеризуется высокой горимостью и трендом к увеличению количества пожаров в последние десять лет.

Источником информации об очагах пожаров и мощности тепловыделения служили продукты обнаружения активных пожаров MOD14 и MYD14 (для данных со спутников TERRA и AQUA соответственно), коллекция 5 [Giglio, 2013].

Радиационная мощность пожара вычисляется по измерениям радиационной температуры в среднем инфракрасном диапазоне, которому соответствуют 21 и 22 каналы MODIS (3,93–3,99 мкм) [Justice et al., 2006]. Пространственное разрешение данных MODIS составляет 1 км, однако на больших углах сканирования реальный размер наземной проекции пикселя может быть значительно больше. При этом увеличение площади пикселя приводит к увеличению значения радиационной мощности, так как в продукте MOD14 коллекции 5 значение радиационной мощности пикселя линейно связано с его площадью. Чтобы избежать завышения радиационной мощности на краях изображения, ее значение делилось на фактическую площадь пикселя, рассчитанную по формулам, приведенным в работе С. Ichoku, Y. J. Kaufman [2005], т. е. рассматривалось значение радиационной мощности с единицы площади пикселя.

Всем пожарам присваивались атрибуты, характеризующие преобладающий тип растительности, который определялся по картам растительности [Ландшафтная карта..., 1988; Bartalev et al., 2002], а также значения показателей пожарной опасности по условиям погоды. На основании карт растительности выделялись территории с преобладанием сосновых насаждений, лиственницы, пихты и ели, а также лиственные леса. Ежедневные метеоданные для расчета пожарной опасности по условиям погоды брали из сети метеостанций NOAA NCDC (<http://>

www7.ncdc.noaa.gov/CDO/cdo). Использовались данные с 10 метеостанций, расположенных в указанном районе. Для сравнения вычислялся показатель канадской системы CFFWIS (Canadian Forest Fire Weather Index System) [Van Wagner, 1987] и российский ПВ-1 [Вонский и др., 1975]. Связь радиационной мощности с погодными условиями анализировалась только для пожаров, действующих на расстоянии не более 100 км от метеостанции в условиях устойчивого антициклона.

Пожарные пиксели классифицировались в соответствии со значениями радиационной мощности. Для этого весь диапазон значений радиационной мощности разбивался на интервалы по 50 МВт, и вычислялась доля каждого интервала в общем количестве пожарных пикселей, что характеризует частоту встречаемости пожара с заданным значением мощности тепловыделения.

К факторам, определяющим мощность тепловыделения пожаров, отнесены преобладающий тип растительности, уровень горимости, погодные условия и категория пожара по площади. Согласно современной классификации пожары, развивающиеся на площадях 2000 га и более, относятся к крупным или экстремально крупным пожарам [Валендик, 1990; Иванов и др., 2011; Андреев, Брюханов, 2011]. Это пороговое значение использовалось для разделения пожаров в базе данных по категориям площади. В соответствии с результатами долговременного спутникового мониторинга установлено, что до 90 % пострадавших площадей есть результат воздействия таких пожаров [Пономарев, Швецов, 2013]. Для выделения пожаров итоговой площадью более 2000 га использовалась база данных Института леса им. В. Н. Сукачева СО РАН. Средствами ГИС из продукта MOD14 выделялись пожарные пиксели, которые соответствовали пожарным полигонам площадью более 2000 га и полигонам площадью менее 2000 га. Статистическая значимость различий между рядами значений радиационной мощности, соответствующим разным факторам, оценивалась с помощью *U*-критерия Манна – Уитни [Гублер, Генкин, 1973].

Для всех рассмотренных пожарных сезонов дана оценка уровня горимости территории по количеству пожаров за сезон (с мая

по август). В качестве порогового значения для определения уровня горимости (низкий или высокий) использовалось среднее значение числа пожаров, обнаруживаемых за сезон в период с 2008 по 2013 г. К сезонам низкой горимости отнесены 2008–2011 гг., высокой – 2012, 2013 гг. В пределах каждого сезона по аналогичной методике выделялись и анализировались отдельные 10-дневные периоды.

В заключении построено пространственное распределение радиационной мощности пожаров для территории исследований, которое рассчитывалось на основе регулярной сети с размером ячейки 1°. Каждой ячейке присваивались значения средней радиационной мощности за каждый год с 2008 по 2013 г.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Полученные значения радиационной мощности с единицы площади подчинялись степенному закону распределения, где на пожарные пиксели с низкими значениями радиационной мощности (менее 50 МВт/км²) приходится до 75–90 % всех обнаруженных пикселей. Это согласуется с результатами, приводимыми в литературе для пожаров, действующих в бореальных лесах Евразии и Северной Америки [Wooster, Zhang, 2004; Kumar et al., 2011; Barrett, Kasischke, 2013].

Различия регистрируемой радиационной мощности в связи с рассматриваемыми влияющими факторами представлены на рис. 1. Все факторы следует признать значимыми, так как согласно примененному *U*-критерию Манна – Уитни вероятность случайного события не превышала $p < 0,1$ % [Гублер, Генкин, 1973].

В сезоны высокой горимости, характеризующиеся большим числом обнаруженных пожаров и значительными площадями, пройденными огнем, доля пожарных пикселей со значениями радиационной мощности менее 50 МВт/км² снижалась (см. рис. 1, а). Среднее значение радиационной мощности увеличивалось, составляя 34,0 МВт/км² в сезоны низкой горимости, 39,2 МВт/км² – в сезоны высокой горимости. Около 75 % от общего числа пожаров, обнаруженных за рассматриваемый период, возникло в сезоны

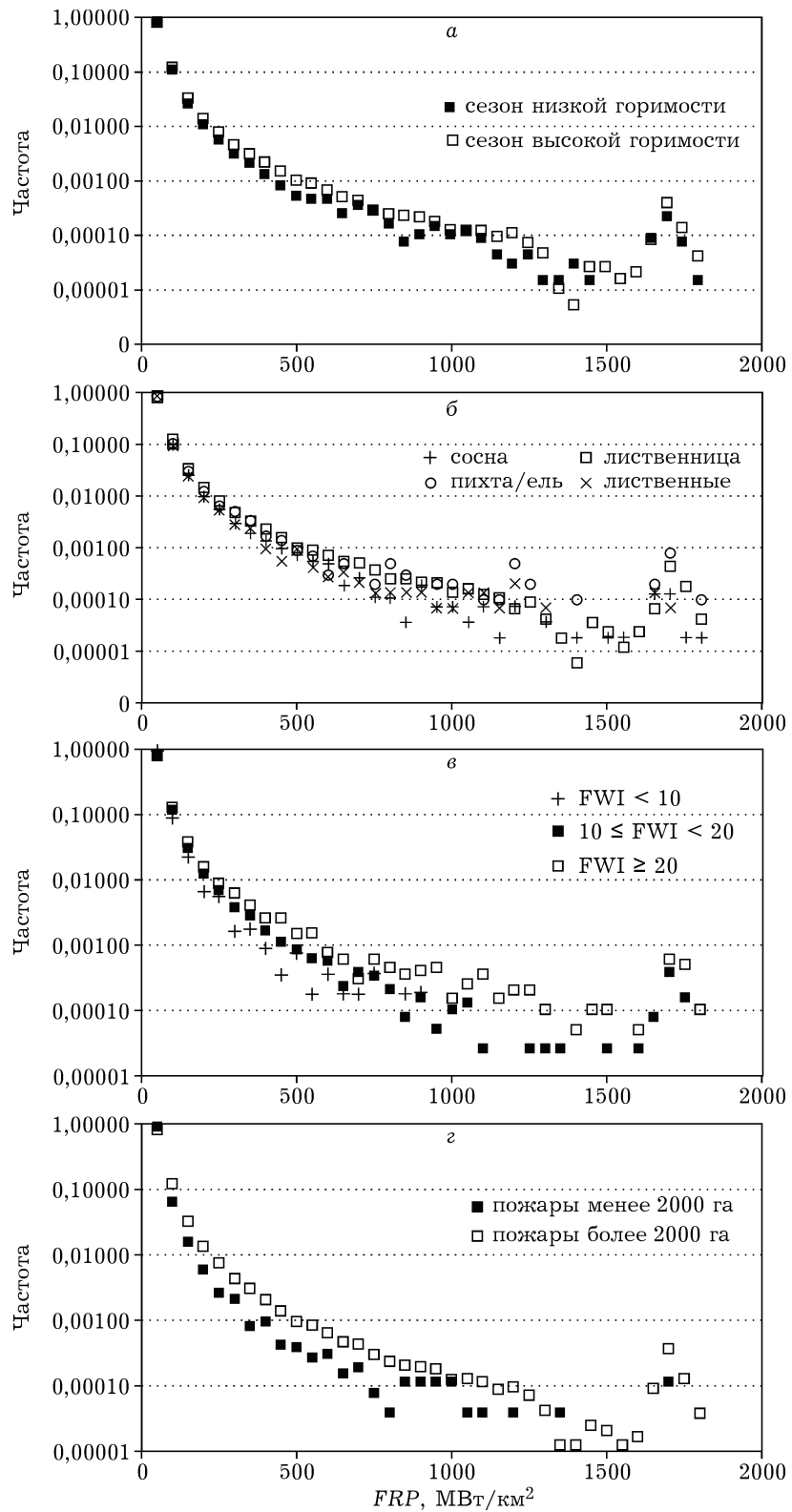


Рис. 1. Распределение пожарных пикселей по значениям радиационной мощности с единицы площади: а – сезоны различной пожарной активности; б – для различных типов леса; в – при различных уровнях пожарной опасности по условиям погоды, г – для разных категорий пожаров

высокой горимости, при этом показатель мощности теплоизлучения в этом случае, как правило, на 10 % выше. Пожары, действовавшие в лесах с преобладанием лиственных древостоев, а также пихты и ели, характеризовались более высокими значениями (до 42,8 МВт/км²) радиационной мощности по сравнению с интенсивностью пожаров (35,1 МВт/км²) в лесах с преобладанием сосновых насаждений и в лиственных лесах (см. рис. 1, б).

Динамика уровня пожарной опасности по условиям погоды также влияла на частоту появления пожарных пикселей с высокой мощностью теплоизлучения (см. рис. 1, в). Так, при значениях индекса *FWI* канадской системы *CFFWIS* менее 10 доля таких пикселей составляла 13 %, с ростом индекса до 20 и более количество соответствующих пикселей достигало 22 %. Сравнение с российским индексом ПВ-1 также позволило констатировать, что при высоких уровнях пожарной опасности растет доля пожарных пикселей, характеризующихся высокими значениями радиационной мощности.

Крупные и экстремально крупные по площади пожары также обладали более высокими показателями радиационной мощности с единицы поверхности зоны активного горения (см. рис. 1, г). Для таких пожаров частота обнаружения пикселей с радиационной мощностью более 50 МВт/км² примерно вдвое выше (19 % всех случаев), чем для средних и малоразмерных пожаров (9 % всех случаев).

Присутствие минимума частоты появления пожарных пикселей в диапазоне значений радиационной мощности 1300–1600 МВт/км² и последующего максимума в диапазоне 1600–1750 МВт/км² (см. рис. 1) связаны, по всей вероятности, с насыщением в среднем инфракрасном диапазоне канала 21 радиометра *TERRA/MODIS*. На рис. 2 показаны гистограммы распределения по значениям радиационной мощности пожарных пикселей, обнаруженных спутником *TERRA*, и распределение температур пожарных пикселей в 21 канале.

Аппаратурой спутника *TERRA* не регистрировались пожарные пиксели с температурами 480 К и выше из-за насыщения 21 канала, а пикселям, в которых имело место насыщение, в продукте *MOD14* присваивалось значение температуры 499,967 К, что

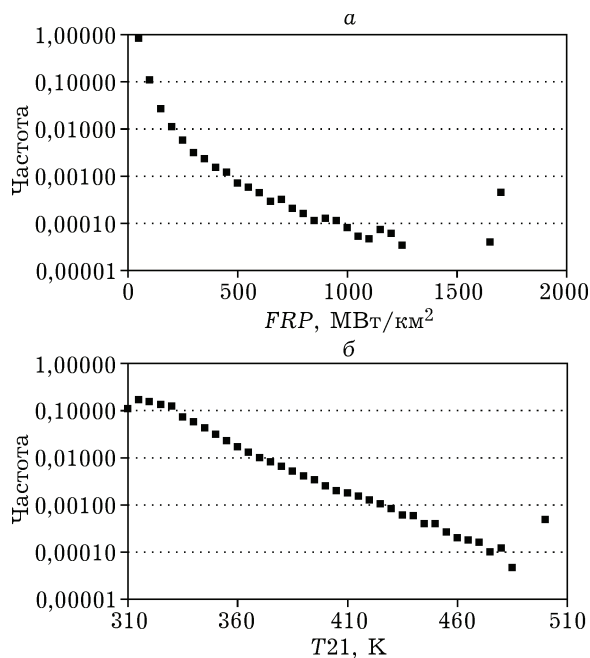


Рис. 2. Распределение пожарных пикселей, обнаруженным спутником *TERRA*: а – по значениям радиационной мощности; б – по температуре 21 канала

соответствует значениям радиационной мощности примерно 1620–1650 МВт, в зависимости от температуры фона. При этом максимальным ненасыщенным значениям температуры (около 480 К) соответствует *FRP* порядка 1240–1260 МВт. Температуры в диапазоне от 480 до 499 К, соответствующие *FRP* = 1260–1620 МВт, спутником *TERRA* не регистрировались (см. рис. 2). В результате данный участок гистограммы заполнялся только на основе данных аналогичного радиометра, установленного на спутнике *AQUA*, обладающем более высокой температурой насыщения 21 канала.

Анализ распределения пожаров в течение сезона показал, что частота их обнаружения, характеризуемых значениями радиационной мощности более 50 МВт/км², повышается во второй половине пожароопасного сезона (июль и первая декада августа), когда горячие материалы подвергались воздействию устойчивых антициклонов (рис. 3). Такое распределение количества высокоинтенсивных пожаров во времени согласуется с приведенными в литературе характеристиками пожароопасных сезонов для территории Средней Сибири [Валендик, 1990; Sukhinin et al., 2004;

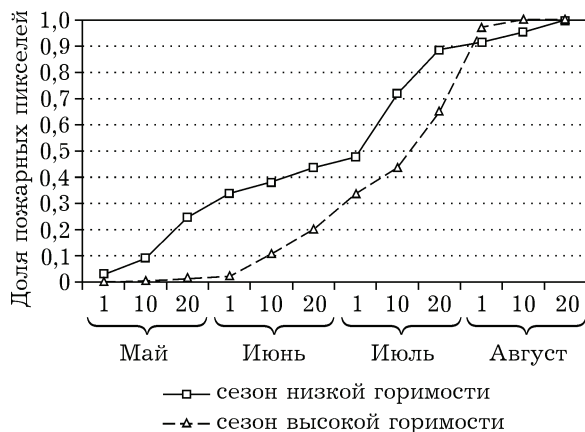


Рис. 3. Динамика количества регистрируемых пожарных пикселей ($FRP > 50 \text{ MWt/km}^2$) для сезонов низкой и высокой горимости

Валендик и др., 2014]. Средняя радиационная мощность пожаров, действующих в таких условиях, выше на 8–10 %.

На исследуемой территории в рассматриваемый период времени наиболее подвержены пожарам леса с преобладанием лиственных древостоев. В лиственничниках Якутии и Эвенкии, на долю которых приходилось примерно 51 % территории, регистрировалось около 66 % всех пожарных пикселей. Средняя радиационная мощность пожаров здесь составила $44,5 \text{ MWt/km}^2$. На леса с преобладанием сосны приходится около 10 %

территории и около 21 % обнаруженных пожаров со средней мощностью $35,7 \text{ MWt/km}^2$. На лиственные леса и леса с преобладанием ели и пихты приходится около 6 % и 4 % территории, а средняя мощность пожаров составила $34,4 \text{ MWt/km}^2$ и $41,2 \text{ MWt/km}^2$ соответственно.

Пространственное распределение средней мощности излучения от лесных пожаров по территории Сибири представлено на рис. 4. Наибольшая средняя радиационная мощность отмечена для пожаров, действовавших в западных районах Якутии, и составила около 50 MWt/km^2 , при этом средняя мощность пожаров на остальной территории Сибири – около 37 MWt/km^2 .

Установлено, что рост уровня пожарной опасности по условиям погоды сопровождался увеличением фиксируемых значений радиационной мощности (рис. 5). Рассмотрены интегральные (рассчитываемые как сумма значений всех пожарных пикселей в окрестности метеостанции, MWt) и средние значения радиационной мощности от активных зон пожаров, измеряемые в мегаваттах с квадратного километра. Интегральные значения радиационной мощности в большей степени коррелируют с уровнем пожарной опасности, чем средние. Это свидетельствует о том, что рост уровня пожарной опасности по условиям по-

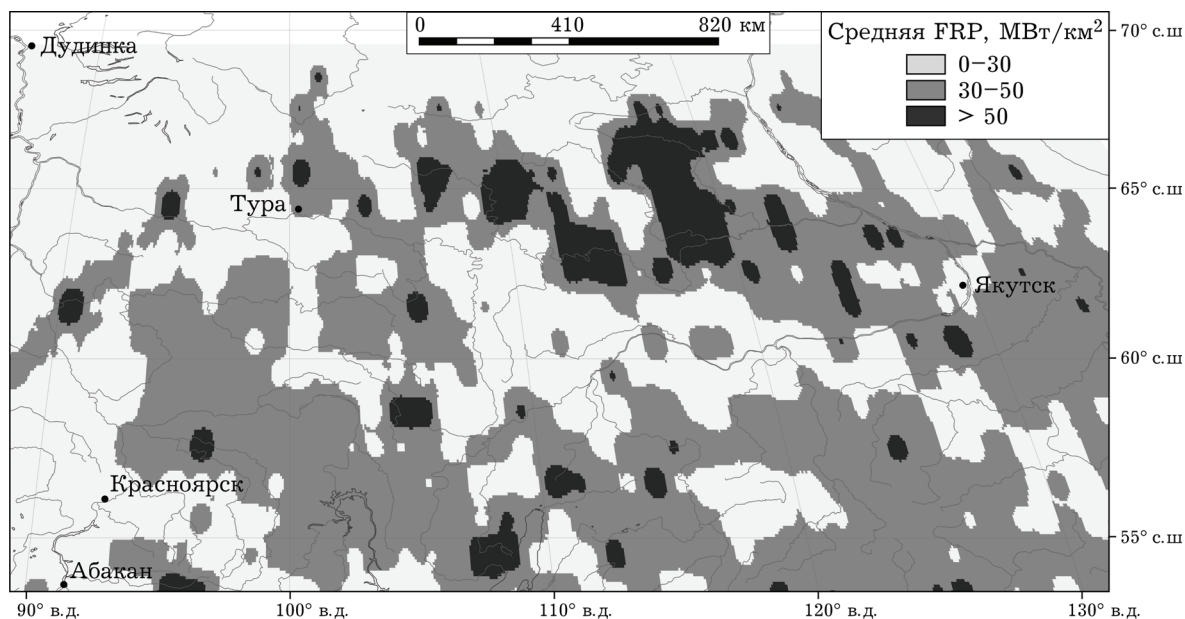


Рис. 4. Распределение средней радиационной мощности пожарных пикселей по территории Сибири за 2008–2013 гг.

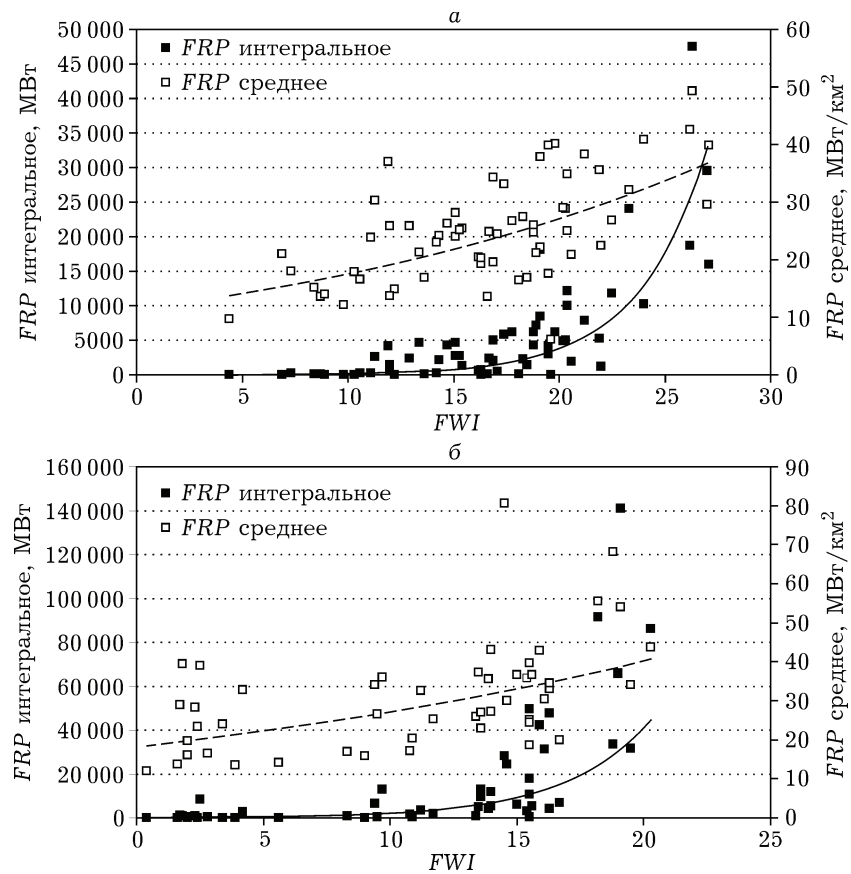


Рис. 5. Соотношения между значениями интегральной и средней радиационной мощности для территории Западной Сибири и Якутии в 2012 г.: а – Западная Сибирь; б – Якутия. Каждая точка соответствует одному дню

годы вызывает не только повышение средней интенсивности тепловыделения, но и увеличение скорости распространения пожара, что косвенно проявляется в увеличении числа регистрируемых пожарных пикселей. При этом уровень пожарной опасности сильнее влияет на количество обнаруженных пожарных пикселей, чем на средние значения радиационной мощности.

Анализ корреляционной зависимости между временными рядами FWI и суммарной радиационной мощности показал связь на уровне $r = 0,21-0,73$, среднее значение составило 0,6.

Связь между уровнем пожарной опасности, оцениваемым с помощью показателя FWI , и радиационной мощностью пожаров достоверно характеризуется экспоненциальной функцией вида

$$FRP = a \exp(b \text{ FWI}),$$

где a и b – коэффициенты.

Коэффициенты функции могут существенно отличаться как для различных лесных районов, так и для разных пожароопасных сезонов, что свидетельствует о многофакторной зависимости мощности теплоизлучения от пожаров (см. рис. 5).

Например, для пожаров в Западной Сибири и в Якутии коэффициенты a функции отличаются на порядок (7, 73 и 115,1 соответственно), при этом разница коэффициентов b незначительна (0,3 и 0,29 соответственно).

Российский индекс оценки пожарной опасности по условиям погоды ПВ-1 в меньшей степени коррелировал с регистрируемыми значениями радиационной мощности. Для интегральной радиационной мощности и ПВ-1 корреляция зафиксирована на уровне 0,04–0,55. Это, вероятно, связано с тем, что индекс FWI учитывает больше факторов, влияющих на поведение пожара, по сравнению с ПВ-1. Например, фактором, оказывающим существенное влияние на интенсивность теп-

ловыделения пожара и, следовательно, его радиационную мощность, является скорость ветра [Byram, 1959; Van Wagner, 1987], которая не учитывается при расчете показателя ПВ-1, но учитывается для *FWI*. Хотя показатель *FWI* характеризует динамику изменения радиационной мощности (снижение и рост), амплитуда таких изменений может существенно различаться. В частности, при близких значениях показателя *FWI* (27,1 и 26,3), при экстремальной пожарной опасности по условиям погоды, зафиксированы интегральные значения радиационной мощности от полигона пожара 18 725 и 47 543 МВт соответственно (см. рис. 5, а).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Инструментально, с использованием архивных спутниковых данных, проведена оценка значимости влияния таких факторов, как тип растительности, метеорологические условия и общий уровень горимости в течение пожароопасного сезона на дистанционно регистрируемую мощность тепловыделения лесных пожаров. Пожары, действующие в сезоны высокой горимости, характеризуются более высокими (выше на 10–15 %) средними значениями мощности теплоизлучения. В привязке к картам растительности и преобладающим древостоям установлено, что радиационная мощность пожаров в темнохвойных лесах и лиственничниках в среднем на 20–25 % выше, чем при горении лиственных и сосновых лесов в сходных метеорологических условиях и при одинаковом уровне пожарной опасности.

Сопряженный анализ спутниковых данных и метеорологической информации позволил оценить уровень корреляционной связи между мощностью теплоизлучения от зоны активного горения и показателями пожарной опасности по условиям погоды. Значения коэффициента корреляции составили соответственно 0,6 и 0,2 для канадской системы оценки пожарной опасности *FWI* и российского показателя ПВ-1. При этом пожары, регистрируемые в периоды высокой пожарной опасности по условиям погоды, характеризуются более высокими значениями мощности теплоизлучения: доля пожарных пикселей с радиационной мощностью более 50 МВт/км²

составила 13 % и 22 % от общего числа пожарных пикселей за сезон для значений *FWI* менее 10 и более 20 соответственно.

Проведенная геопространственная интерполяция радиационной мощности пожаров, зафиксированных на территории Сибири в 2008–2013 гг. показала, что наибольшая средняя радиационная мощность характерна для пожарных пикселей, зафиксированных в лиственничных насаждениях западных районов Якутии (до 50 МВт/км²), при этом средняя мощность теплоизлучения пожарных пикселей для территории Сибири не превышала 37 МВт/км².

Таким образом, дистанционно получаемая информация о мощности тепловыделения от пожара – принципиально новый вид атрибутивных данных о пожарах, детализирующих и дополняющих существующие архивы лесных пожаров. Многолетний архив спутниковых данных и ежедневно получаемая оперативная информация наряду с реализованными ГИС-технологиями обработки данных имеют большое значение как в системе противопожарной охраны лесов, так и для оценки последствий пожаров и долговременных трендов динамики экосистем в масштабах Сибири.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект №14-24-00112).

ЛИТЕРАТУРА

- Андреев Ю. А., Брюханов А. В. Профилактика, мониторинг и борьба с природными пожарами (на примере Алтае-Саянского экорегиона): справоч. пособие. Красноярск, 2011. 272 с.
- Бондур В. Г. Космический мониторинг природных пожаров в России в условиях аномальной жары 2010 г. // Исслед. Земли из космоса. 2011. № 3. С. 3–13.
- Валендик Э. Н. Борьба с крупными пожарами. М.: Наука, 1990. 193 с.
- Валендик Э. Н., Кисилыхов Е. К., Рыжкова В. А., Пономарев Е. И., Данилова И. В. Крупные пожары в таежных ландшафтах Центральной Сибири // География и природ. ресурсы. 2014. № 1. С. 52–59.
- Вонский С. М., Жданко В. А., Корбут В. И., Семенов М. М., Тетюшева Л. В., Завгородняя Л. С. Определение природной пожарной опасности в лесу: метод. рекомендации. Л.: ЛенНИИЛХ, 1975. 40 с.
- Гублер Е. В., Генкин А. А. Применение непараметрических критериев статистики в медико-биологических исследованиях. Л., 1973, 142 с.
- Иванов В. А., Иванова Г. А., Москальченко С. А. Справочник по тушению природных пожаров. Проект ПРООН/МКИ. Красноярск, 2011. 130 с.
- Ландшафтная карта СССР, масштаб: 1 : 4 000 000 / ред. А. Г. Исаченко, 1988.

- Пономарев Е. И., Швецов Е. Г. Характеристики категорий пожаров растительности в Сибири по данным спутниковых и других наблюдений // Исслед. Земли из космоса. 2013. № 5. С. 45–54.
- Barrett K., Kasischke E. S. Controls on variations in MODIS fire radiative power in Alaskan boreal forests: Implications for fire severity conditions // Remote Sensing of Environment. 2013. Vol. 130. P. 171–181.
- Bartalev S.A., Belward A., Erchov D.V., Isaev A.S. A new SPOT4-VEGETATION derived land cover map of Northern Eurasia. // Intern. Journ. of Remote Sensing. 2003. Vol. 24, N 9. P. 1977–1982.
- Byram G. M. Combustion of forest fuels // In Forest Fire: Control and Use. New York: McGraw-Hill, 1959. P. 61–89.
- Ichoku C., Kaufman Y. J. A method to derive smoke emission rates from MODIS fire radiative energy measurements. // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 2005. Vol. 43. P. 2636–2649.
- Justice C. O., Giglio L., Korontzi S. et al. The MODIS fire products // Remote Sensing of Environment. 2002. Vol. 83. P. 244–262.
- Justice C. O., Giglio L., Boschetti L. et al. Algorithm Technical Background Document. MODIS Fire Products (Version 2.3, 1 October 2006) // EOS ID# 2741. 2006.
- Giglio L. MODIS Collection 5 Active Fire Product User's Guide (Version 2.5, 31 March 2013), 2013.
- Kasischke E., Turetsky M. Recent changes in the fire regime across the North American boreal region – Spatial and temporal patterns of burning across Canada and Alaska // Geophys. Res. Lett. 2006. Vol. 33. P. L09703.
- Kasischke E. S., Verbyla D., Rupp T. S. et al. Alaska's changing fire regime – Implications for the vulnerability of its boreal forests // Canad. Journ. of Forest Res. 2010. Vol. 40. P. 1313–1324.
- Kaufman Y., Remer L., Ottmar R., Ward D., Rong R. L., Kleidman R., Fraser R., Flynn L., McDougal D., Shelton G. Relationship between remotely sensed fire intensity and rate of emission of smoke: SCAR-C experiment // Global biomass burning / ed. J. Levine. MA: MIT Press, 1996. P. 685– 696.
- Kumar S. S., Roy D. P., Boschetti L., Kremens R. Exploiting the power law distribution properties of satellite fire radiative power retrievals: A method to estimate fire radiative energy and biomass burned from sparse satellite observations // J. of Geophys. Res. 2011. Vol. 116. P. 1–18.
- Loupian E. A., Mazurov A. A., Flitman E. V. et al. Satellite Monitoring of Forest Fires in Russia at Federal And Regional Levels // Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change. 2006. Vol. 11, N 1. P. 113–145.
- Peterson D., Wang J., Ichoku C., Remer L. A. Effects of lightning and other meteorological factors on fire activity in the North American boreal forest: implications for fire weather forecasting // Atmospheric Chem. and Phys. 2010. Vol. 10. P. 6873–6888.
- Peterson D., Wang J. A sub-pixel-based calculation of fire radiative power from MODIS observations: 2. Sensitivity analysis and potential fire weather application // Remote Sensing of Environment. 2013. Vol. 129. P. 231–249.
- Sukhinin A. I., French N. H. F., Kasischke E. S. et al. AVHRR-based mapping of fires in Russia: New products for fire management and carbon cycle studies // Ibid. 2004. Vol. 93. P. 546–564.
- Sukhinin A. I. Space Monitoring and Analysis of Catastrophic Fires in Central Siberia and Far East // North-East Asia, A la Carte, Center For North-East Asian Studies. Tohoku University. 2008. Vol. 19. P. 19–23.
- Van Wagner C. E. Development and structure of the Canadian Forest Fire Weather Index System // Can. For. Serv., Petawawa. Techn. Rep. 35. Ontario, 1987. 37 p.
- Vermote E., Ellicott E., Dubovik O. et al. An approach to estimate global biomass burning emissions of organic and black carbon from MODIS fire radiative power // J. Geophys. Res. 2009. Vol. 114. P. 1–22.
- Wooster M. J. Small-scale experimental testing of fire radiative energy for quantifying mass combusted in natural vegetation fires // Geophys. Res. Lett. 2002. Vol. 29 (21). P. 2027 (doi: 10.1029/ 2002GL015487).
- Wooster M. J., Zhang Y. H. Boreal forest fires burn less intensely in Russia than in North America // Ibid. 2004. Vol. 31. L20505 (doi:10.1029/2004GL020805).

Estimating the Influence of Environmental Factors on the Fire Radiative Power Using Satellite Imagery

E. G. SHVETSOV, E. I. PONOMAREV

*V. N. Sukachev Institute of Forest SB RAS
660036, Krasnoyarsk, Akademgorodok, 50/28
E-mail: eugeneshvetsov11@yandex.ru*

In this work the influence of environmental factors (prevailing tree stands, intensity of the fire season, weather conditions) on the fire radiative power (*FRP*) was analyzed. The data from the Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) were used to characterize the variations of fire radiative power. Our studies showed that during the periods of high fire activity the *FRP* was 10 % higher than during the periods of low fire activity. The correlation level between the *FRP* and weather fire danger was determined. In particular, the fire weather index (*FWI*) of Canadian weather fire danger assessment system showed a closer relationship with the *FRP* in comparison with the Russian PV-1 index. It was also found that the fires in Siberian forests with the predominance of larch trees generally had 20–25 % higher *FRP* values than the fires in deciduous and pine forests.

Key words: satellite data, fire, fire radiative power, heat emission, fire danger, correlation.