

Расширенное заседание Президиума СО РАН
«Лесные ресурсы Сибирского федерального округа:
внедрение научных разработок»
Новосибирск, 6 декабря 2018

Спутниковые данные в оценке и прогнозировании прямых пожарных эмиссий в Сибири

Пономарев Е. И., Швецов Е.Г.,
Литвинцев К.Ю., Пономарева Т.В., Харук В.И.

ФИЦ КНЦ СО РАН, Лаборатория ДЗ,
Институт леса им. В. Н. Сукачева СО РАН,
Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН



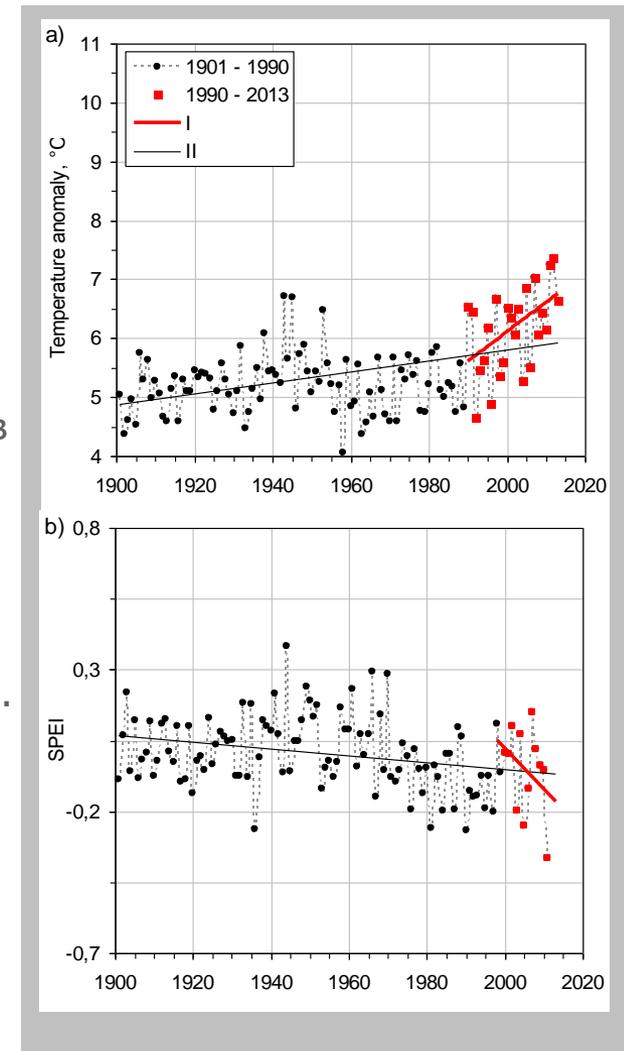
Пожары в меняющемся климате

Температурные аномалии, изменение режима выпадения и перераспределение осадков, а также повторяемость засушливых периодов – комплекс факторов, определяющих современную динамику пожарных режимов.

Первая декада XXI века характеризуется увеличением частоты возникновения пожаров и их площадей (Flannigan et al., 2009; Kharuk et al., 2013; Пономарев, Харук, 2016). До **70–90 %** пожаров в РФ фиксируется в Сибири.

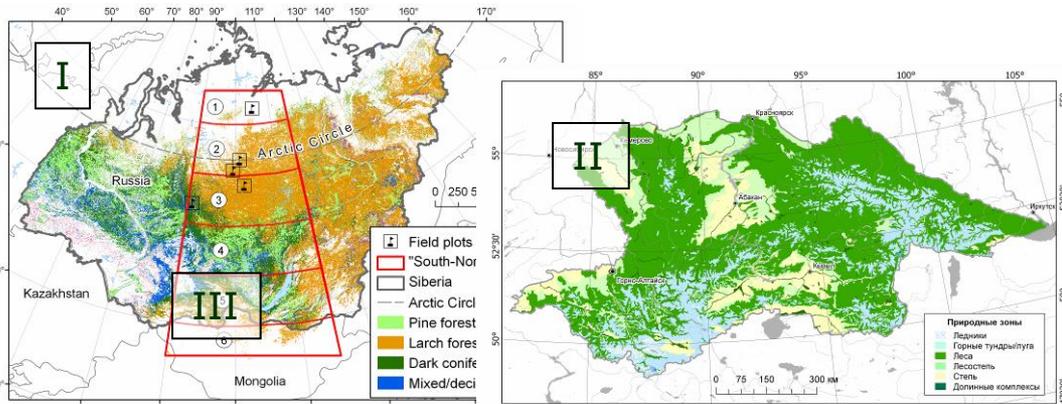
Согласно прогнозам, пожарные эмиссии углерода, которые в настоящее время составляют **120–140 Тг/год** (Швиденко и др., 2011), при современных темпах могут достигнуть **230–240 Тг/год** во второй половине 21-го века (Замолотчиков и др., 2011).

Развитие средств дистанционного мониторинга пожаров, являются актуальным и востребованным элементом системы контроля и прогнозирования пожаров и пожарных воздействий в условиях меняющегося климата.



Ponomarev E.I., Kharuk V.I. (2016) Wildfire Occurrence in Forests of the Altai-Sayan Region under Current Climate Changes // Contemporary Problems of Ecology. 2016. Vol. 9. № 1. P. 29–36. doi: 10.1134/S199542551601011X

Район интересов



Соглашение между ИЛ СО РАН и The Global Fire Monitoring Center, 2017

**Agreement
between**

**The Global Fire Monitoring Center (GFMC), Max Planck Institute for Chemistry,
Freiburg / Mainz, Germany
Associated Institute of the United Nations University, Tokyo / Bonn,
and Freiburg University, Germany**

and the

**Sukachev Institute of Forest SB RAS, Federal Research Center «Krasnoyarsk Science
Center SB RAS», Krasnoyarsk, Russian Federation**

THE GLOBAL FIRE MONITORING CENTER (hereinafter referred to as "GFMC"), a
subdivision of the Max Planck Institute for Chemistry and Associated Institute of the United
Nations University and Freiburg University, an internationally recognized center of excellence in
the
int

IN WITNESS WHEREOF, the undersigned, duly authorized thereto, have signed this
Agreement.

DONE in duplicate, in English language, in Freiburg and in Krasnoyarsk on 17 March 2017.

For the Global Fire Monitoring Center

For the Sukachev Institute of Forest SB
RAS, FRC «Krasnoyarsk Science Center
SB RAS»

Johann Georg Goldammer
Johann Georg Goldammer
Director

Alexander A. Onuchin
Alexander A. Onuchin
Director

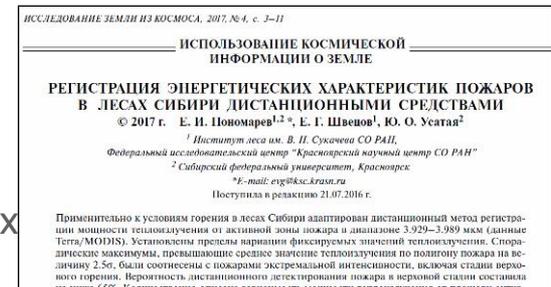
- I - Сибирь
- II - Алтае-Саянский регион
- III - Приенисейская трансекта Средней Сибири
- IV - Евразия (Региональный центр мониторинга пожаров в Евразии / The Global Fire Monitoring Center)

Основные направления исследований

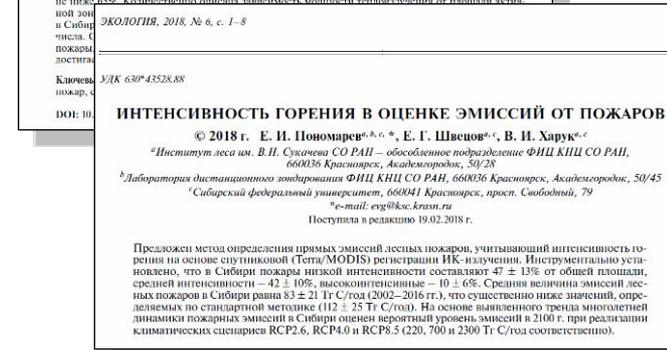
1 геопространственные закономерности горимости и сценарии пожароопасной ситуации для субрегионов Сибири



2 методика оценки интенсивности горения, адаптированная для пожаров в Сибири, регистрация верховых пожаров;



3 инструментальная оценка прямых пожарных эмиссий углерода на основе оперативных спутниковых данных;

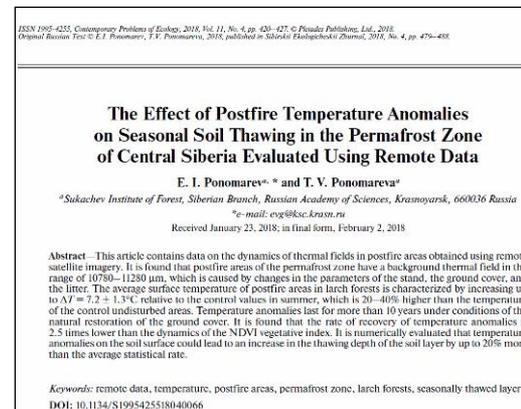


Горимость лесов Сибири и межсезонные вариации уровня тепло- и влагообеспеченности

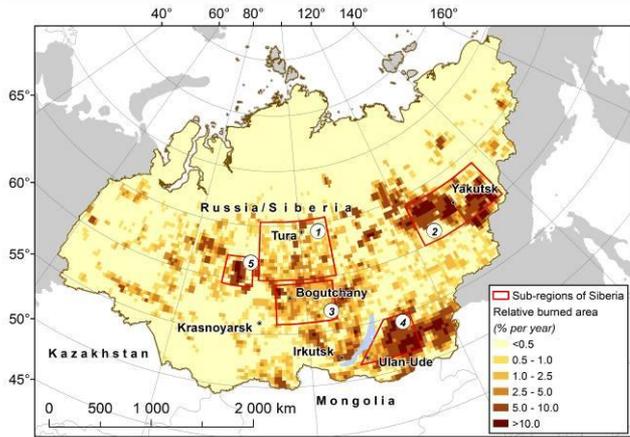
Е. И. Пономарев*, **, А. С. Скоробогатова**,
Т. В. Пономарева* **

Анализируются горимость лесов Сибири на субрегиональном уровне и межсезонные вариации уровня тепло- и влагообеспеченности. Используются инструментальные данные о пожарах, зафиксированных средствами спутникового мониторинга за период 1996–2016 гг. По ряду метеорологических данных для отдельных регионов Сибири исследована динамика пожарной опасности по условиям погоды (показатель ПВ-1) выявлены межсезон-

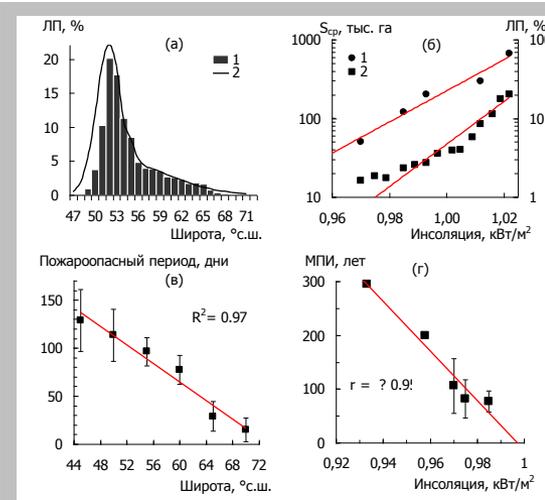
4 мониторинг послепожарных тепловых аномалий, моделирование аномалий в сезонно-талом слое



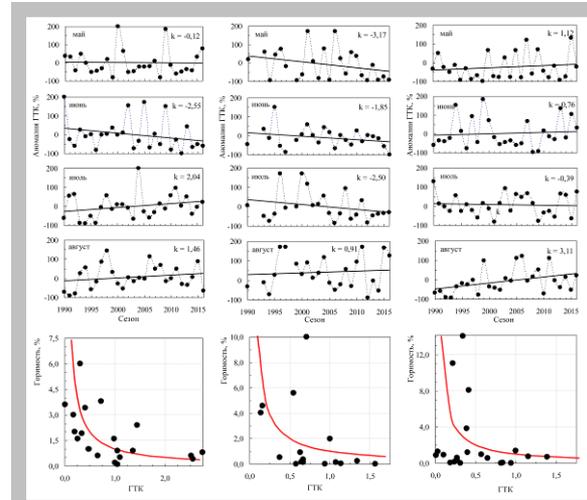
Горимость лесов Сибири



Горимость лесов Сибири, %



Многолетние вариации горимости
на широтном градиенте



Зависимость «Горимость – ГПК»
Приангарье Эвенкия Якутия

Сценарии пожарной опасности

Сценарий	P{E} (Min–max)	T, лет	Горимость, % (Min–Max)
I	0.18–0.20	8 ± 3	4.5–14.5
IIa	0.24–0.57	4 ± 1	0.5–1.5
IIb	0.24–0.38	3 ± 1	1.0–4.0
III	0.19–0.48	4 ± 2	0.01–0.3

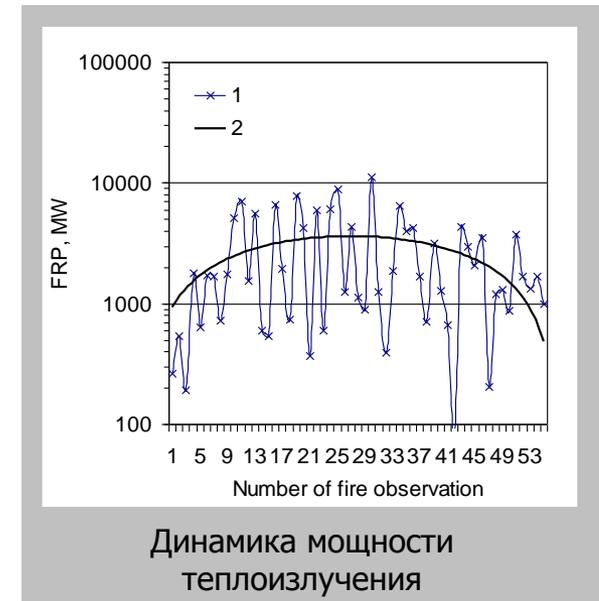
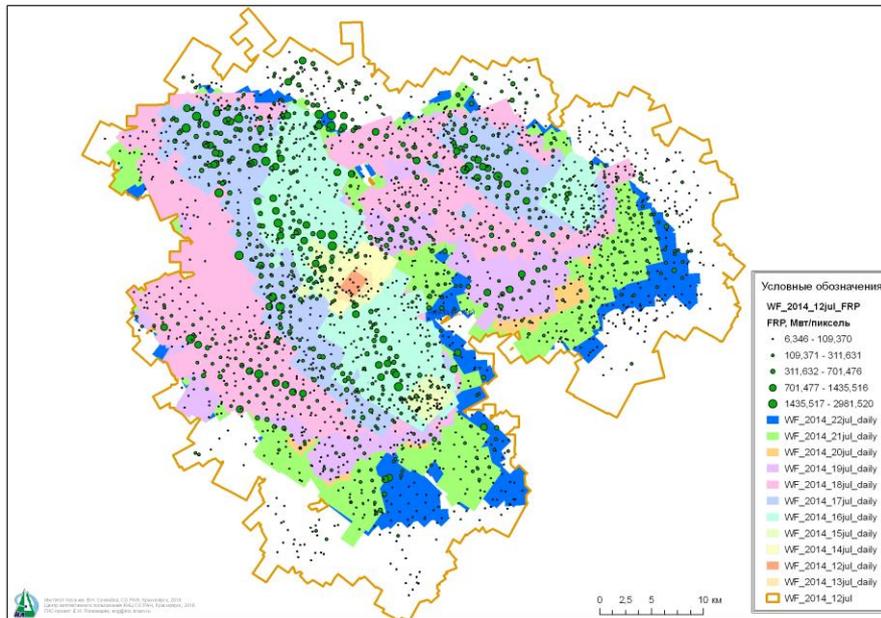
Горимость варьирует **0.1% — 14.5%**
Среднее для Сибири — **1.19%**, для лесов
запада Канады — **0.56%** (*deGroot et al.,
2013*).



Kharuk V.I., Ponomarev E.I. (2017) Spatiotemporal Characteristics of Wildfire Frequency and Relative Area Burned in Larch-dominated Forests of Central Siberia // Russian Journal of Ecology. Vol. 48, No 6, p. 507–512. doi: 10.1134/S1067413617060042

Пономарев Е.И., Скоробогатова А.С., Пономарева Т.В. (2018) Горимость лесов Сибири и межсезонные вариации уровня тепло- и влагообеспеченности // Метеорология и гидрология. № 7. С. 45-55.

Теплоизлучение и интенсивность

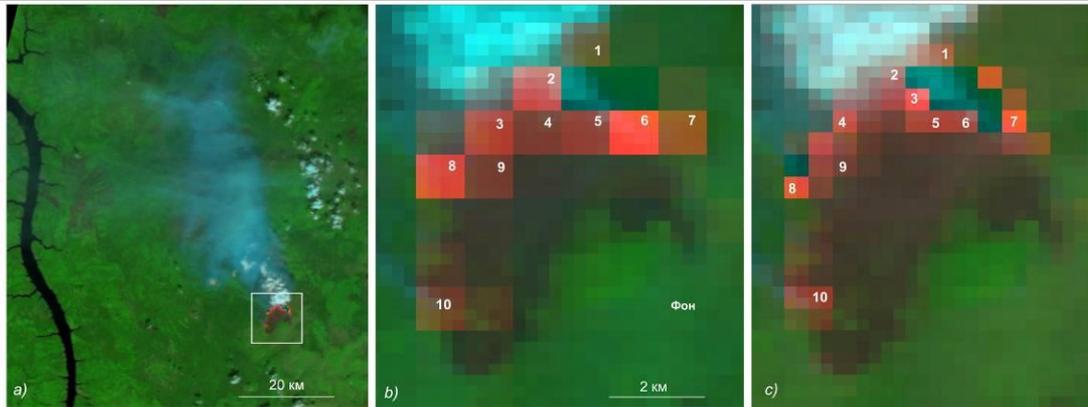


Для оценки мощности теплоизлучения от активной зоны пожара использованы данные TERRA/Modis в диапазоне 4 мкм/стандартный продукт MOD14 (*Kaufman et al., 1998; Justice et al., 2002*).

Метод адаптирован для условий горения в Сибири;
реализован пороговый критерий классификации пожаров по интенсивности и регистрации стадий высокоинтенсивного горения и пожаров в верховой фазе.

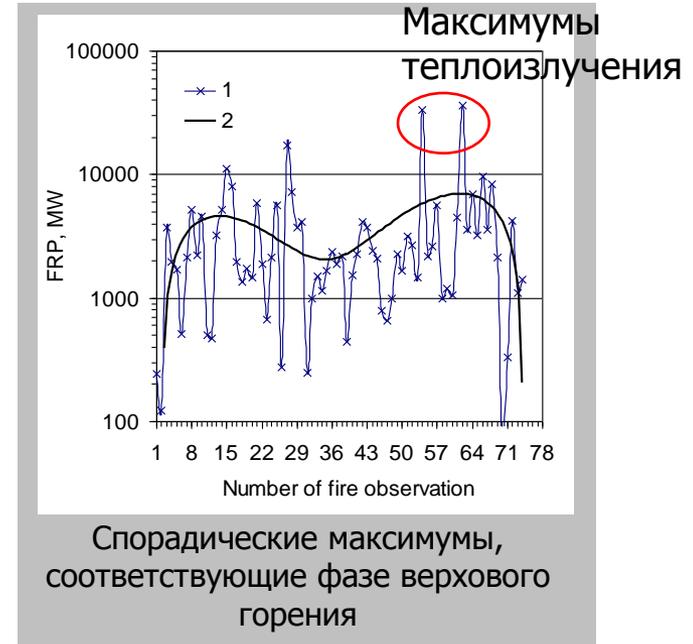
Показано (*Пономарев и др., 2017, 2018*), что доля FPR от интегральной мощности пожара составляет ~15%. Варьирование (на уровне 10–30%) обеспечивают сценарий протекания пожара (удельная скорость выгорания 0.01 – 0.1 кг/м²с, скорость распространения фронта 0.01 – 0.1 м/с).

Экстремальные и верховые пожары



Критерий детектирования верховой стадии горения - порог $2.5\sigma_{FRP}$ от среднего значения по полигону пожара.

Вероятность дистанционной регистрации пожара в верховой стадии – не ниже 65%.



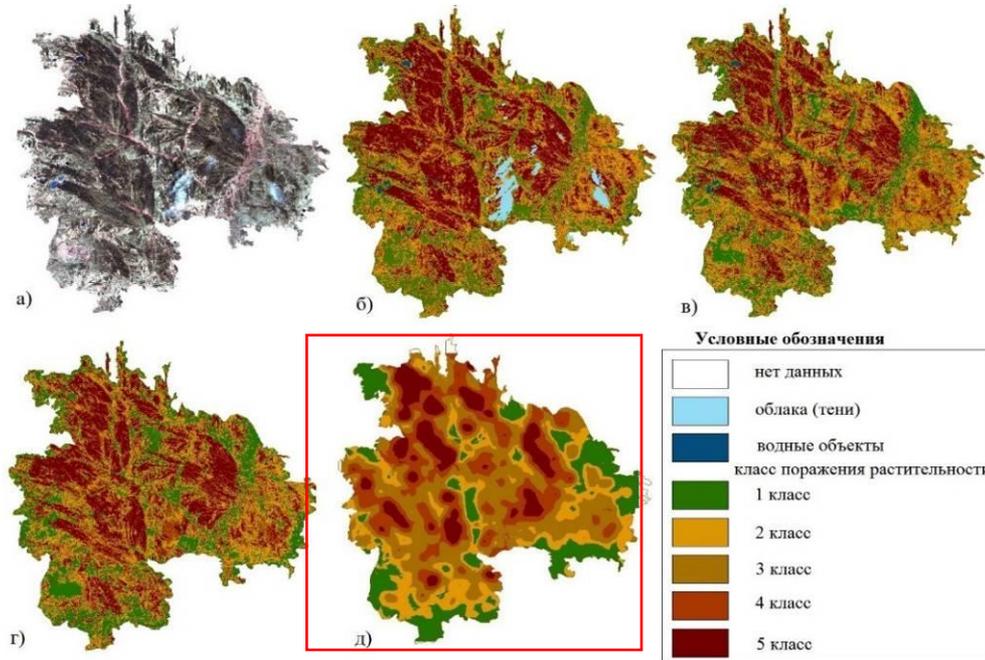
Доля лесных пожаров с участками экстремального теплоизлучения ежегодно составляет $5.5 \pm 1.2\%$ от общего числа.

В Сибири ежегодно $\sim 8.5\%$ всех пройденных огнем площадей приходится на участки с экстремально высокой интенсивностью горения.



Пономарев Е.И., Швецов Е.Г., Усатая Ю.О. (2017) Регистрация энергетических характеристик пожаров в лесах Сибири дистанционными средствами // Исследование Земли из космоса. №4. С. 3–11. doi:10.7868/S0205961417040017.

Сравнительный анализ классификации



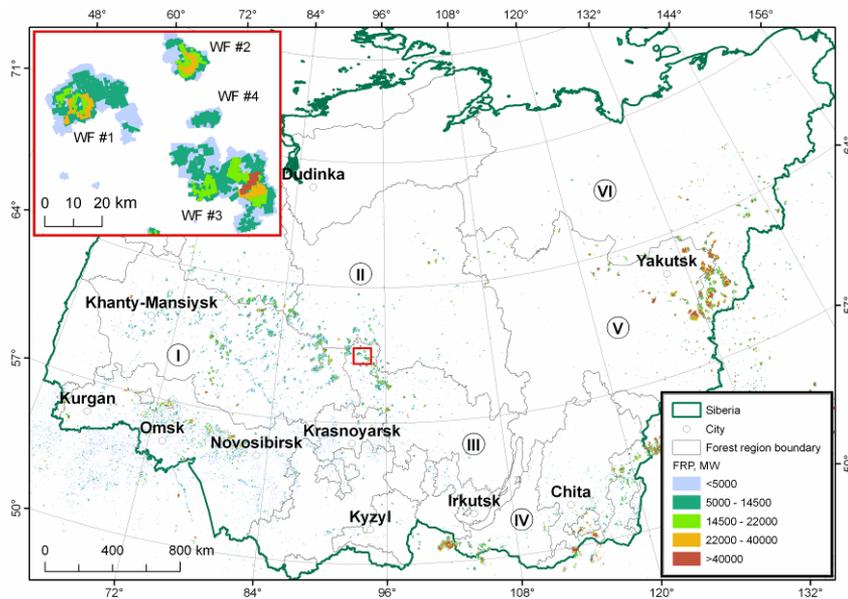
Пример классификации снимка постпирогенного участка:

- а) исходное изображение
- б) неуправляемая классификация
- в) NDVI
- г) dNBR
- д) FRP – классификация зон переменной интенсивности

Оценка пожарного воздействия и мониторинг послепожарных изменений может проводиться не только на основе «традиционных» методов анализа вегетационных индексов, но и с использованием показателя, характеризующего энергетику пожара в различные моменты времени (**мощности теплоизлучения – FRP**).

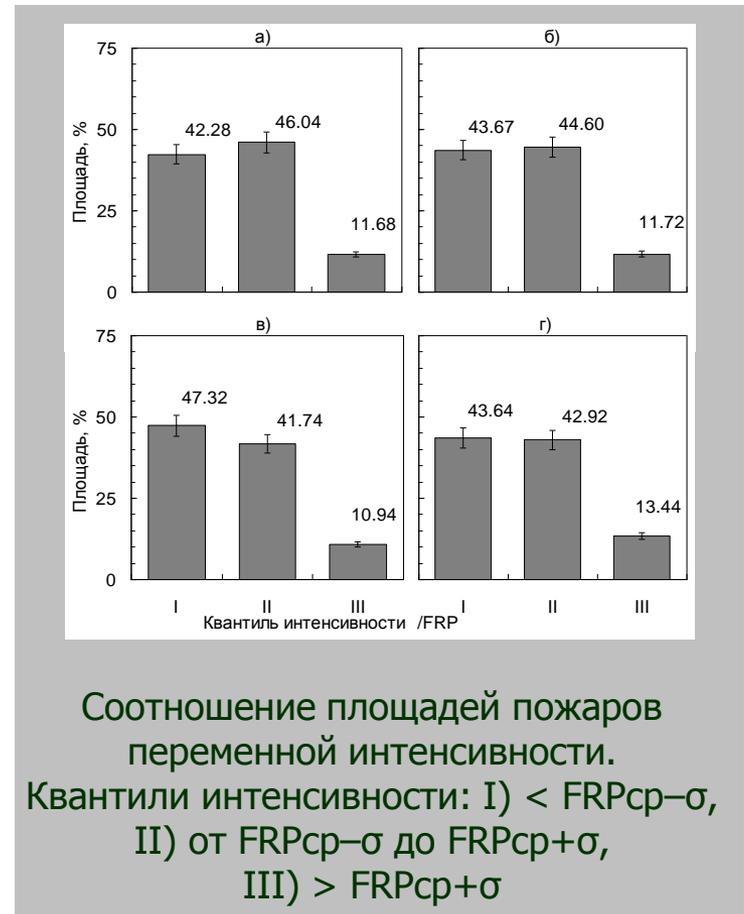
Этот подход может быть использован как **оперативный метод качественной и количественной диагностики** послепожарного состояния растительности, а также как способ дистанционной оценки **количества сгорающего** при пожаре ЛГМ при заданных условиях.

Оценка интенсивности



Дифференцированный учет количества сгоревших ЛГМ (коэффициента полноты сгорания) возможен на основе решения обратной задачи относительно мощности теплоизлучения (Fire Radiative Power – FRP) активной зоны пожара.

Мощность теплоизлучения линейно связана с количеством сгоревшей биомассы (*Wooster et al., 2002*).



Соотношение площадей пожаров
переменной интенсивности.
Квантили интенсивности: I) $< FRP_{ср} - \sigma$,
II) от $FRP_{ср} - \sigma$ до $FRP_{ср} + \sigma$,
III) $> FRP_{ср} + \sigma$



Пономарев Е.И., Швецов Е.Г., Харук В.И. (2018) Интенсивность горения в оценке эмиссий от пожаров // Экология. №6. С. 1–8.
doi:10.1134/S0367059718060094

Расчет пожарных эмиссий

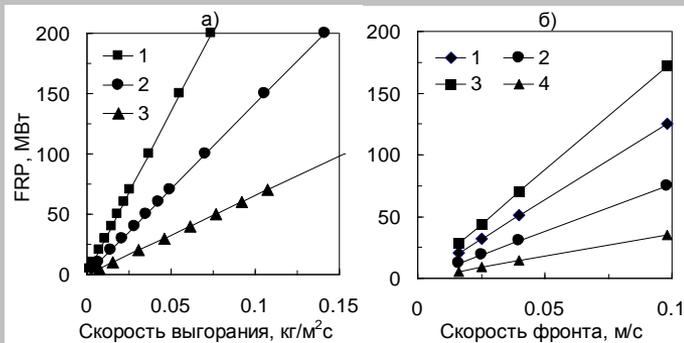
$M_{\text{ЛГМ}}$, (кг)

Площадь пожаров (м^2)
коэффициент полноты сгорания (β)
запас ЛГМ ($\text{кг}/\text{м}^2$)

Методика классификации полигона
пожара по теплоизлучению /
дифференциальный учет интенсивности

Адаптированный метод оценки массы
сгоревших ЛГМ (кг);
адаптированный метод оценки прямых
пожарных эмиссий ($\text{Tг С}/\text{год}$)

Преобладающие древостои	S , млн га/год	Нижняя оценка		Верхняя оценка		% эмиссии (min-max)
		$\text{Tг С}/\text{год}$	τ С/га	$\text{Tг С}/\text{год}$	τ С/га	
Лиственничник	2.765	42.9	15.5	52.0	18.8	51.6–62.4
Сосняк	0.656	11.0	16.7	11.8	18.0	13.2–14.2
Темнохвойные	0.153	1.9	20.4	3.1	20.4	2.3–3.7
Лиственные/с мешанные	0.275	3.8	13.7	4.7	17.24	4.5–5.7



Вариация регистрируемой мощности
теплоизлучения (FRP) от параметров пожара в
модельных уравнениях

а) FRP в зависимости от скорости выгорания фитомассы ($\text{кг}/\text{м}^2\text{с}$) с учетом площади активного горения в пикселе: 1) 1000 м^2 , 2) 500 м^2 , 3) 250 м^2 ;

б) зависимость от скорости распространения фронта и запасов фитомассы в активной зоне пожара ($\text{кг}/\text{м}^2$): 1) для 1.5 $\text{кг}/\text{м}^2$ и $\beta = 0.55$, 2) для 1.5 $\text{кг}/\text{м}^2$ и $\beta = 0.4$, 3) для 2.5 $\text{кг}/\text{м}^2$ и $\beta = 0.55$, 4) для 0.7 $\text{кг}/\text{м}^2$ и $\beta = 0.4$



Пономарев Е.И., Швецов Е.Г., Литвинцев К.Ю. (2018) Калибровка оценок пожарных эмиссий на основе данных дистанционного зондирования // Иссл. Земли из космоса. 2018.

Среднемноголетние оценки

Метод	Масса горючих материалов (М)			Прямые пожарные эмиссии (С)			$\Delta M_{\text{отн}}$ и $\Delta C_{\text{отн}}$		
	10^{12} кг	σ	ϵ для $\alpha = 0.1$	Тг С / год	σ	ϵ	%	σ	ϵ для $\alpha =$ 0.1
Стандартный	0.192	0.131	0.067	111.9	68.4	25.4	17.3	1.6	0.8
Дифференциальный учет интенсивности	0.159	0.108	0.055	83.1	56.5	21.0			

Рассчитанные значения прямых эмиссий (83 ± 21 Тг С/год) в среднем на 17% ниже, чем результат (112 ± 25 Тг С/год), полученный с использованием стандартной методики (см. *Soja et al., 2004*).

Эмиссии варьировали от минимальных значений 20–40 Тг С/год (2004, 2005, 2007, 2009, 2010 гг.) до 227 Тг С/год в 2012 г.

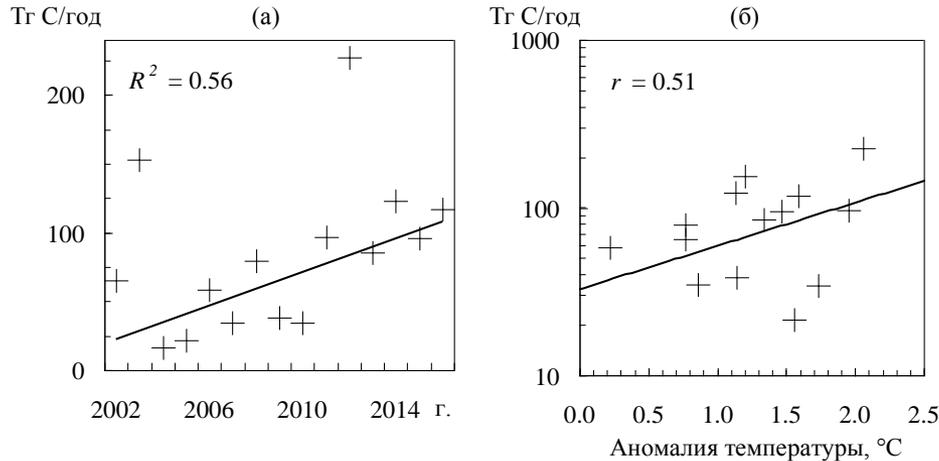
Это значительно ниже экстремальных оценок как для пожаров Сибири (>500 Тг С/год) (*Soja et al., 2004*), так и для Канады (>300 Тг С/год) (*de Groot et al., 2013*).

Межгодовая вариабельность вклада пожаров переменной интенсивности в объем эмиссий составляла 33–37%, 47–49%, 14–17% для низко-, средне- и высокоинтенсивных пожаров. Соответствующие удельные значения эмиссий составляли 8.7, 12.0 и 15.4 т С/га.



Ponomarev E.I., Shvetsov E.G., Litvintsev K.Y., Bezkorovaynaya I.N., Ponomareva T.V., Klimchenko A.V., Ponomarev O.I., Yakimov N.D., Panov A.V. Remote Sensing Data for Calibrated Assessment of Wildfire Emissions in Siberian Forests // Proceedings. 2018. Vol.2. № 7 (348). 7 p. DOI: 10.3390/ecrs-2-05161.

Прогнозные значения прямых пожарных эмиссий



Вариация прямых углеродных эмиссий от пожаров Сибири на временном интервале 2002–2016 гг.:

- а) тренд на основе многолетнего ряда ($p < 0.05$);
- б) связь с аномалиями температуры воздуха

1 Прямые эмиссии от пожаров Сибири (2002–2016 гг.) 83 ± 21 Тг С/год, что существенно ниже ($\sim 20\%$) оценок, полученных без учета интенсивности (112 ± 25 Тг С/год).

2 При сохранении трендов аномалий температуры пожарные эмиссии в конце XXI в. увеличатся **вдвое** (220 Тг С/год) при реализации «мягкого» сценария IPCC (**RCP2.6**, повышение температуры на $0.3\text{--}1.7^\circ\text{C}$);

при «жестком» сценарии (**RCP8.5**, возрастание на $2.6\text{--}4.8^\circ\text{C}$) рост прямых пожарных эмиссий **на порядок**.



Пономарев Е.И., Швецов Е.Г., Харук В.И. (2018) Интенсивность горения в оценке эмиссий от пожаров // Экология. №6. С. 1–8. doi:10.1134/S0367059718060094

