

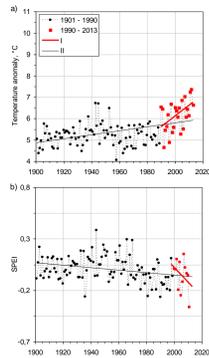
# Спутниковые данные в оценке и прогнозировании прямых пожарных эмиссий в Сибири

Пономарев Е.И. (1, 2)\*, Швецов Е.Г. (1), Литвинцев К.Ю. (3), Пономарева Т.В. (1), Харук В.И. (1)

(1) Институт леса им. В.Н. Сукачева СО РАН, Федеральный исследовательский центр «КНЦ СО РАН», Красноярск;  
 (2) ФИЦ КНЦ СО РАН, лаборатория дистанционного зондирования, Красноярск;  
 (3) Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск  
 \*e-mail: evg@ksc.krasn.ru, тел.: +7 391 2494092

## Аннотация

Впервые для Сибири предложен и апробирован метод определения прямых эмиссий лесных пожаров, учитывающий интенсивность горения на основе спутниковой (Terra/MODIS) регистрации ИК-излучения. Использован многолетний банк пожаров (2002–2017 гг.), фиксируемых спутниковыми средствами, Института леса им. В.Н. Сукачева СО РАН, ФИЦ КНЦ СО РАН. Квантили интенсивности для активных зон пожара определены пороговым методом на основе значений мощности теплоизлучения (Fire Radiative Power, FRP) «пожарных» пикселей. Инструментально установлено соотношение площадей пожаров низкой, средней и высокой интенсивности ( $47 \pm 13\%$ ,  $42 \pm 10\%$  и  $10 \pm 6\%$  соответственно) и их вклад в прямые эмиссии углерода. Получена оценка среднемноголетнего (2002–2017 гг.) значения пожарных эмиссий ( $83 \pm 21$  Тг/год). Установлена связь роста эмиссий с трендом аномалий температуры воздуха на территории Сибири, выполнен прогноз уровня эмиссий до конца XXI в. при реализации климатических сценариев RCP2.6, RCP4.0 и RCP8.5 (220, 700 и 2300 Тг/год соответственно).



## Актуальность

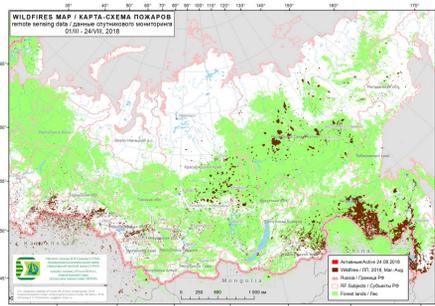
Первая декада XXI века характеризуется увеличением частоты возникновения пожаров и их площадей (Flannigan et al., 2009; Kharuk et al., 2013; Пономарев, Харук, 2016). До 70–90 % пожаров в РФ фиксируется в Сибири.

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 (Замолодчиков 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.

**Цель работы** – разработка инструментального метода определения прямых пожарных эмиссий с учетом интенсивности горения и оценка динамики прямых эмиссий от лесных пожаров в Сибири

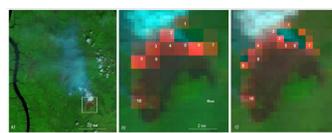
## Территория мониторинга - Евразия



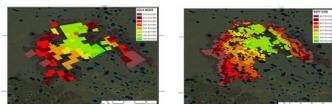
Соглашение между ИЛ СО РАН и The Global Fire Monitoring Center, 2017



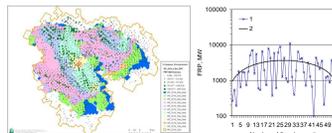
## Исходная информация



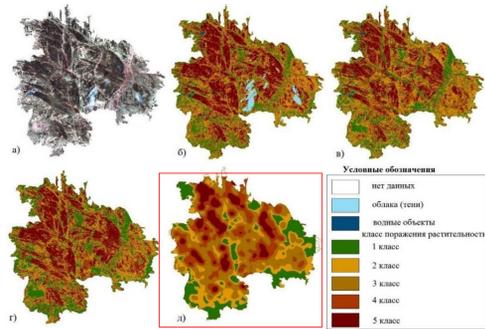
AQUA/TERRA/Modis



AQUA/TERRA/Modis SNPP/VIIRS



AQUA/TERRA/Modis λ ~4 мкм стандартный продукт MOD14



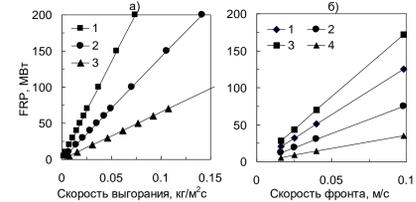
Пример классификации постпирогенного участка на снимке Landsat-8/OLI различными методами:  
 а) исходное изображение  
 б) неуправляемая классификация  
 в) NDVI  
 г) dNBR  
 д) FRP – классификация зон переменной интенсивности

## Публикации:

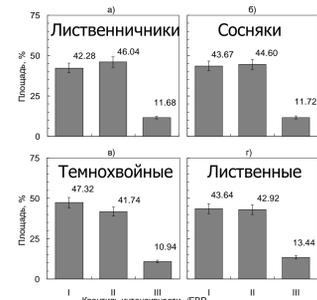
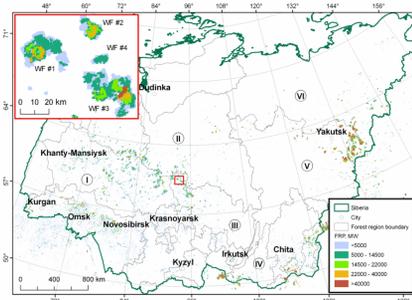
- Пономарев Е.И., Швецов Е.Г., Усатая Ю.О. Регистрация энергетических характеристик пожаров в лесах Сибири дистанционными средствами // Исследование Земли из космоса. 2017. № 4. С. 3–11. doi:10.7868/S0205961417040017
- Ponomarev E.I., Shvetsov E.G., Litvintsev K.Y., Bezkorovaynaya I.N., Ponomareva T.V., 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/ecsrs-2-05161.
- Панов А.В., Прокушкин А.С., Брюханов А.В., Корец М.А., Пономарев Е.И., Сиденко Н.В., Зражевская Г.К., Тимохина А.В., Андреа М. Комплексный подход в оценке эмиссии углеродосодержащих газов от лесных пожаров в Сибири // Метеорология и гидрология. 2018. № 5. С. 30–38.
- Пономарев Е.И., Швецов Е.Г., Харук В.И. Интенсивность горения в оценке эмиссий от пожаров // Экология. 2018. № 6. С. 1–8. DOI: 10.1134/S0367059718060094.
- Ponomarev E.I., Skorobogatova A.S., Ponomareva T.V. Wildfire Occurrence in Siberia and Seasonal Variations in Heat and Moisture Supply // Russian Meteorology and Hydrology, 2018, Vol. 43, No. 7, pp. 456–463. DOI: 10.3103/S1068373918070051.

## Обработка материалов и полученные результаты

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



а) FRP в зависимости от скорости выгорания фитомассы (кг/м²с) с учетом площади активного горения в пикселе: 1) 1000 м², 2) 500 м², 3) 250 м²;  
 б) зависимость от скорости распространения фронта и запасов фитомассы в активной зоне пожара (кг/м²): 1) для 1.5 кг/м² и β = 0.55, 2) для 1.5 кг/м² и β = 0.4, 3) для 2.5 кг/м² и β = 0.55, 4) для 0.7 кг/м² и β = 0.4 (β – коэффициент полноты сгорания).



Соотношение площадей пожаров переменной интенсивности. Квантили интенсивности: I) < FRP<sub>ср</sub> - σ, II) от FRP<sub>ср</sub> - σ до FRP<sub>ср</sub> + σ, III) > FRP<sub>ср</sub> + σ

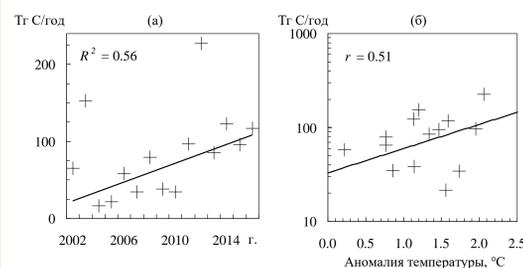
Дифференцированный учет количества сгоревших ЛГМ (коэффициента полноты сгорания) возможен на основе решения обратной задачи относительно мощности теплоизлучения (Fire Radiative Power – FRP) активной зоны пожара. Мощность теплоизлучения линейно связана с количеством сгоревшей биомассы (Wooster et al., 2002).

Нижняя (для «стандартного» пожароопасного сезона) и верхняя (для экстремального сезона) оценки прямых пожарных эмиссий по преобладающим древостоям в Сибири

Преобладающие древостои	S, млн га/год	Нижняя оценка Тг C/год	Верхняя оценка Тг C/год	% эмиссии (min-max)
Лиственничники	2.765	42.9	52.0	51.6–62.4
Сосняки	0.656	11.0	11.8	13.2–14.2
Темнохвойные	0.153	1.9	3.1	2.3–3.7
Лиственные/смешанные	0.275	3.8	4.7	4.5–5.7

Среднемноголетнее значение массы горючих материалов (M) и прямых пожарных эмиссий (C), приведено стандартное отклонение (σ) и доверительный интервал (ε) для α = 0.1.

Метод	Масса горючих материалов (M)			Прямые пожарные эмиссии (C)			ΔM <sub>отн</sub> и ΔC <sub>отн</sub>		
	10 <sup>12</sup> кг	σ	ε	Тг C / год	σ	ε	%	σ	ε
Стандартный	0.192	0.131	0.067	111.9	68.4	25.4	17.3	1.6	0.8
С учетом интенсивности	0.159	0.108	0.055	83.1	56.5	21.0			



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 летнего периода

## Заключение

- Впервые предложен метод параметризации пожаров на основе дистанционного определения мощности теплоизлучения от зон активного горения, на основе которого площади лесных пожаров в Сибири классифицированы с учетом интенсивности горения. Вклад в эмиссии пожаров низкой, средней и высокой интенсивности составляет 33–37%, 47–49% и 14–17%, соответственно.
- Прямые эмиссии от пожаров Сибири за период наблюдений (2002–2016 гг.) составляли в среднем  $83 \pm 21$  Тг/год, что существенно ниже (>17%) оценок, полученных без учета различий в интенсивности горения ( $112 \pm 25$  Тг/год). Диапазон варьирования прямых пожарных эмиссий составлял 20–227 Тг/год. Наибольший вклад (до 50%) в суммарные эмиссии зафиксирован от пожаров в лиственничниках Среднесибирского плоскогорья.
- Установлен значимый временной тренд возрастания прямых пожарных эмиссий, связанный с ростом температуры воздуха. При сохранении указанного тренда пожарные эмиссии в Сибири в конце 21-века могут увеличиться более чем вдвое (220 Тг/год) при реализации «мягкого» сценария IPCC (RCP2.6, повышение температуры на 0.3°C to 1.7°C); при «жестком» сценарии (RCP8.5, возрастание на 2.6°C to 4.8°C) прямые пожарные эмиссии могут возрасти на порядок.



Работа выполнена в рамках государственного задания № 0356–2016–0707 (0356-2017-0739), при поддержке РФФИ и Правительства Красноярского края «Разработка математической модели для количественной оценки эмиссии углерода при пожарах в лесах Сибири на основе дистанционных инструментальных измерений» № 17-41-240475 и РФФИ «Воздействие изменений климата на леса Сибири: анализ горимости лесных территорий, величины прироста хвойных пород, жизненного состояния и продуктивности древостоев» № 18-05-00432.