

# Исследование характеристик пожаров в лесах Сибири по материалам дистанционного мониторинга, наземного обследования и численного моделирования

Пономарев Е. И.<sup>1,2</sup>, Литвинцев К. Ю.<sup>3</sup>, Швецов Е. Г.<sup>1</sup>,  
Безкорвайная И. Н.<sup>4</sup>, Пономарева Т.В.<sup>1</sup>, Климченко А.В.<sup>1</sup>, Пономарев О. И.<sup>4</sup>,  
Якимов Н. Д.<sup>4</sup>, Финников К.А.<sup>3,4</sup>

<sup>1</sup> Институт леса им. В. Н. Сукачева СО РАН, ФИЦ КНЦ СО РАН

<sup>2</sup> Единый региональный центр ДДЗ, ФИЦ КНЦ СО РАН

<sup>3</sup> Институт теплофизики СО РАН

<sup>4</sup> Сибирский федеральный университет

Работа выполнена в Институте леса им. В.Н. Сукачева СО РАН  
при поддержке РФФИ, Правительства Красноярского края,  
Красноярского краевого фонда поддержки  
научной и научно-технической деятельности, проект №17-41-240475.

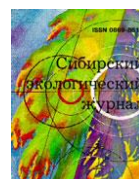
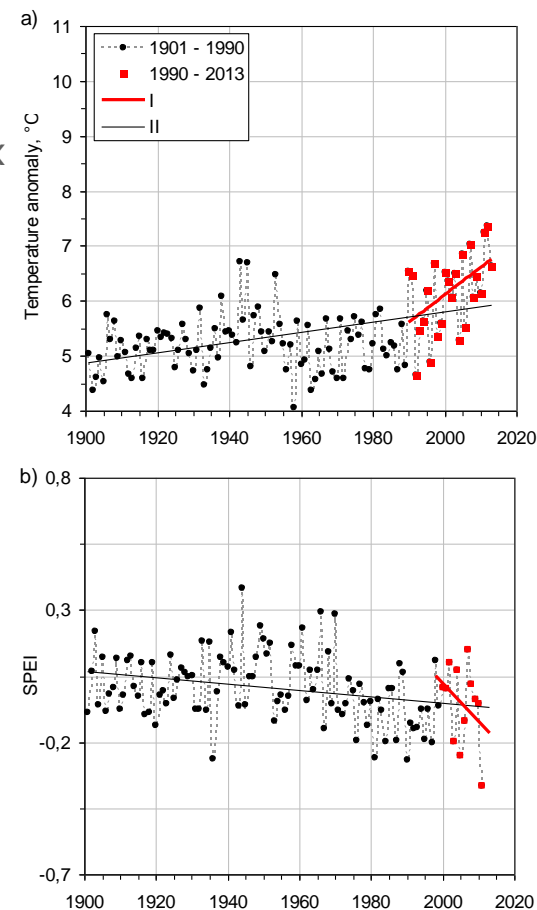


## Пожарные режимы в меняющемся климате

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 площадей, ежегодно подвергающихся пирогенному воздействию, как в масштабах Северного полушария (*Flannigan et al., 2009*), так и в Сибири (*Kharuk et al., 2013; Пономарев, Харук, 2016*), на территории которой фиксируется до **70–90 %** ежегодного количества лесных пожаров России (*Швиденко, Щепаченко, 2013*). 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*).

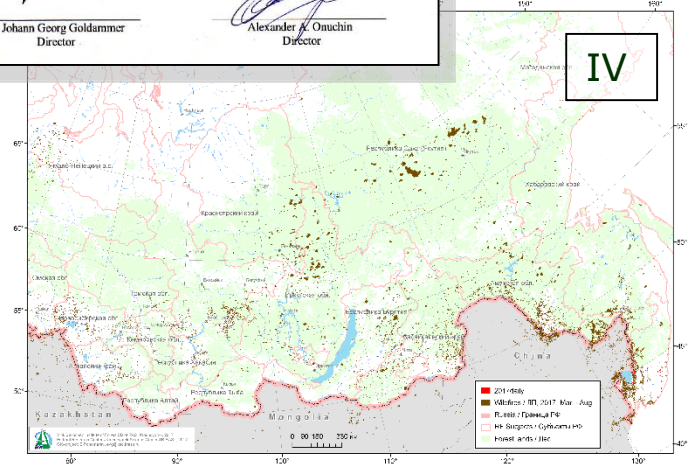
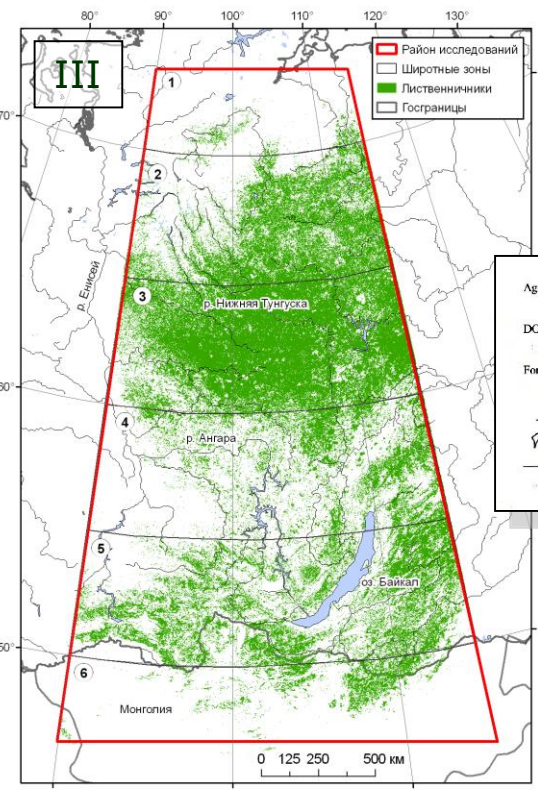
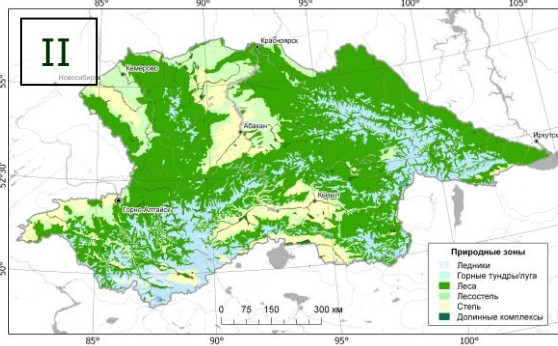
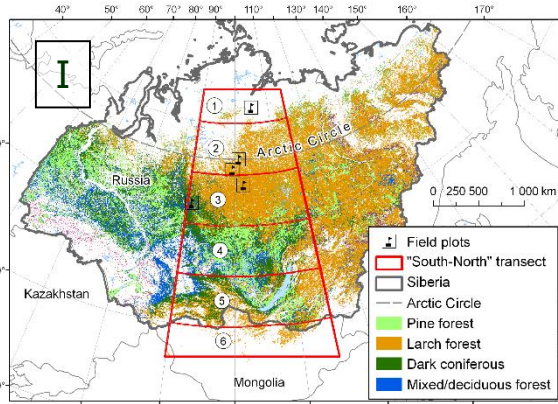
Развитие системы дистанционного мониторинга пожаров, являются актуальным и востребованным как для анализа современного состояния проблемы пожаров, так и для построения прогностических сценариев динамики пожарного воздействия и эмиссий в условиях меняющегося климата.



Пономарев Е.И., Харук В.И. (2016) Горимость лесов Алтае-Саянского региона Сибири в условиях наблюдаемых изменений климата // Сибирский экологический журнал, 2016, №1. С. 38 – 46. doi: 10.15372/SEJ20160104

# Район интересов

Зоны тематического мониторинга:  
 таежные и горно-таежные леса Сибири (I),  
 Алтае-Саянского региона (II),  
 Приенисейская трансекта Средней Сибири (III),  
 Трансбайкальский регион и Центрально-азиатская зона (IV).



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 field of wildland fire science, global wildland fire monitoring, technology transfer and international policy support, serving the United Nations International Strategy for Disaster Reduction (UNISDR) and the Council of Europe as a Specialized Euro-Mediterranean Center under the European and Mediterranean Major Hazards Agreement (EUR-OPA), and serving as Secretariat and Coordinator of the Global Wildland Fire Network (hereinafter referred to as "GWFN"), and the Regional Fire Monitoring / Fire Management Resource Centers; and

THE SUKACHEV INSTITUTE OF FOREST, SIBERIAN BRANCH, RUSSIAN ACADEMY OF SCIENCES (hereinafter referred to as "SIF-SB-RAS"), an internationally recognized center of excellence in the field of wildland fire science, fire monitoring and fire management, and fire management resource centers, hereinafter referred to as "FRC");

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  
*Johann Georg Goldammer*  
 Johann Georg Goldammer  
 Director

For the Sukachev Institute of Forest SB RAS, FRC «Krasnoyarsk Science Center SB RAS»  
*Alexander A. Onuchin*  
 Alexander A. Onuchin  
 Director

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

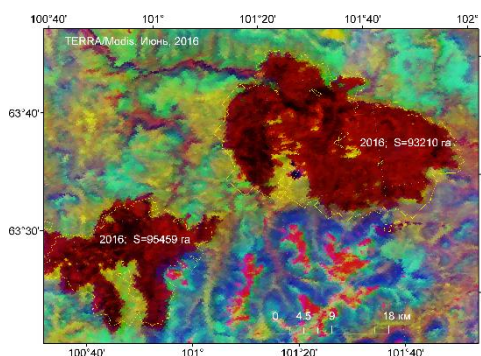
DONE in duplicate, in English language, in Freiburg and in Krasnoyarsk on 17 March 2017.

For the Global Fire Monitoring Center  
*Johann Georg Goldammer*  
 Johann Georg Goldammer  
 Director

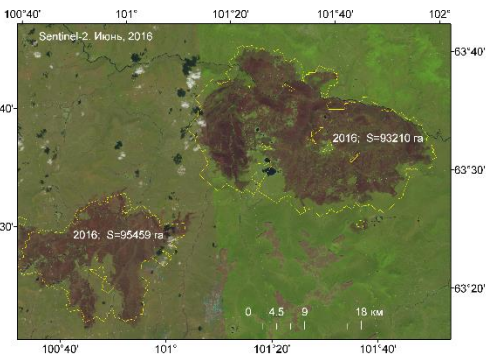
For the Sukachev Institute of Forest SB RAS, FRC «Krasnoyarsk Science Center SB RAS»  
*Alexander A. Onuchin*  
 Alexander A. Onuchin  
 Director



## Исходная информация: спутниковая съемка

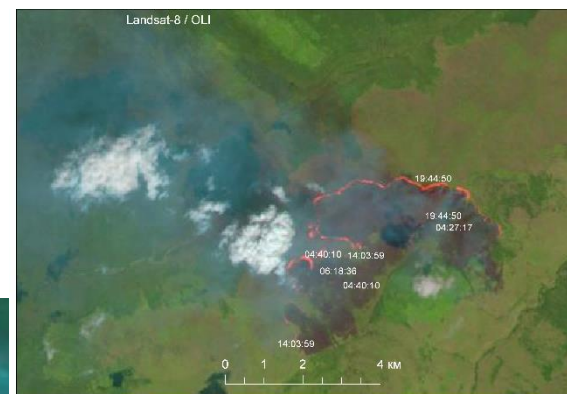


Съемка **TERRA/Modis**  
Эвенкия, июнь, 2016

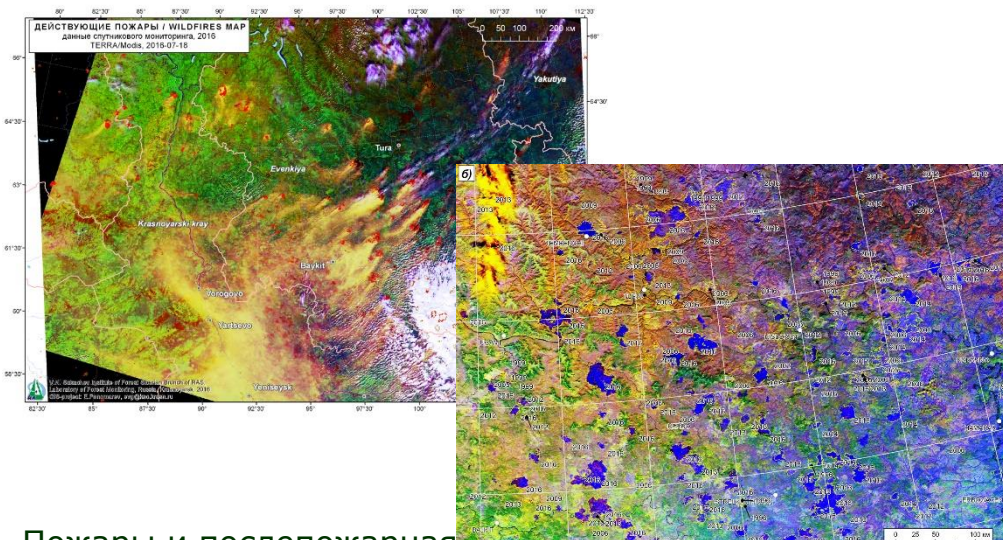


Съемка **Sentinel-2**  
Эвенкия, июнь, 2016

## Съемка **Landsat-8/OLI**, Прибайкалье, 2017

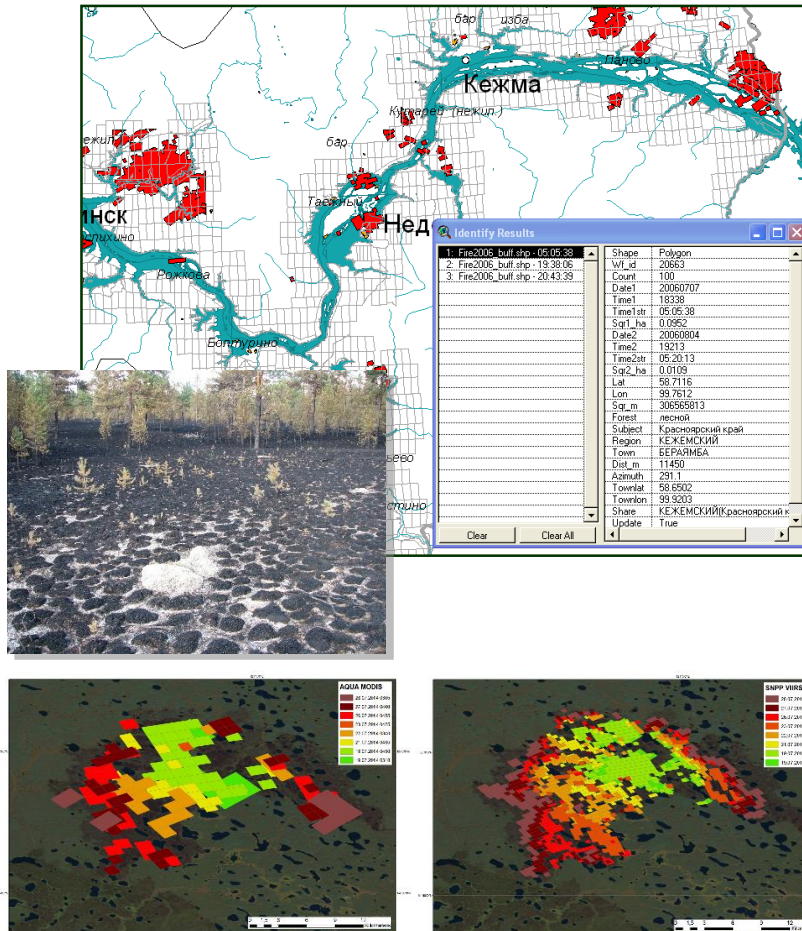


Съемка **TERRA/AQUA/Modis**,  
Прибайкалье, 2017



Пожары и послепожарная  
мозаичность территории.  
Эвенкия. Съемка **TERRA/Modis**. 2016, 2017

## БД пожаров, наземный мониторинг, метеоданные



**AQUA/Modis**

**SNPP/VIIRS**

1

База данных пожаров на территории Сибири – 20-летний период инструментальных спутниковых наблюдений (1996 – 2017 гг.).

Формат представления – векторные слои, атрибутивная информация (покрытия для ГИС).

Количество записей в БД – до  $2 \cdot 10^4$  в год, общее содержание базы данных  $\sim 2 \times 10^6$  записей.

2

Многолетние ряды метеорологической информации из открытых банков данных за период 1990 – 2017 гг. для суб-регионов Сибири (Эвенкия, Якутия, Приангарье, Забайкалье):

Climatic Research Unit (<http://www.cru.uea.ac.uk/>),  
Архив погоды (<http://rp5.ru>), NCDC Climate Data (<http://www7.ncdc.noaa.gov/CDO/cdo>)

3

Материалы (2016–2017) наземного мониторинга и обследований разновозрастных послепожарных участков в лиственничниках Эвенкии (стационар, п. Тура) и в сосняках Приенисейской Сибири (стационар Zotto, п. Зотино);

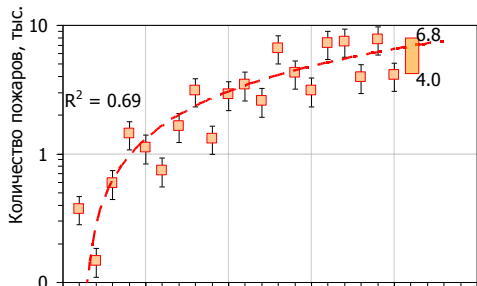
результаты численного моделирования удельной скорости выгорания, интегральной мощности теплоизлучения

Атрибутивная информация о пожаре в базе данных (дата, время, площадь, приращение тактических элементов, энергетические характеристики)

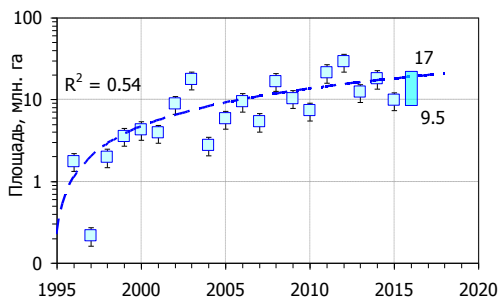
## Анализ базы данных. Категории пожаров

Категории пожаров растительности:

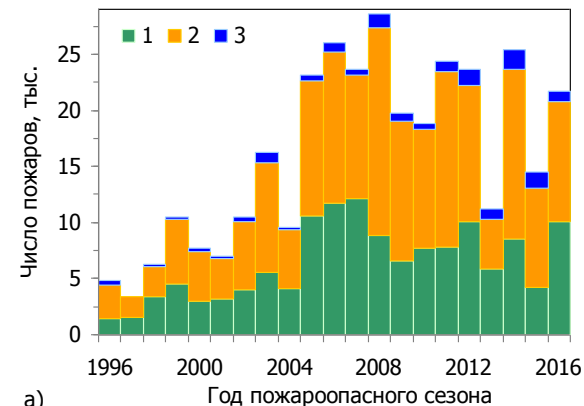
- 1 - лесные пожары до 2000 га (до 50% общего числа; ~20% общей площади);
- 2 - степные пожары и с/х палы, «короткоживущие» объекты (>45% общего числа, более 15% общей площади);
- 3 - экстремальные пожары (до 5% общего числа, до 75% площади)



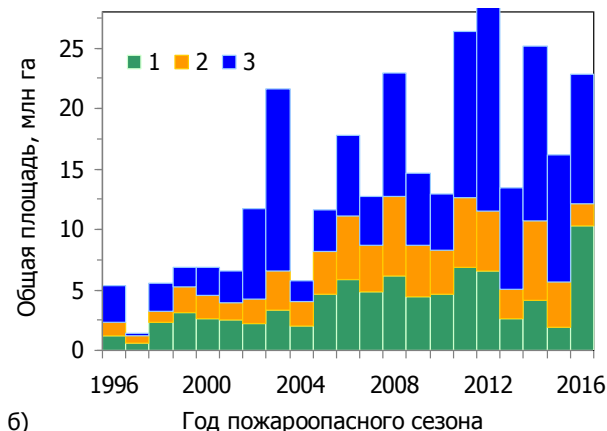
Межсезонная динамика пожаров Сибири, относимых к категории экстремально крупных ( $S > 2.5$  тыс. га)



Количественно зафиксирована связь статистики пожаров с аномалиями температур ( $r = 0.60$ ); длительности ПО периода и межпожарных интервалов с вариацией геофизического параметра инсоляции ( $r = 0.9$  и  $-0.95$  соответственно)



а)



б)

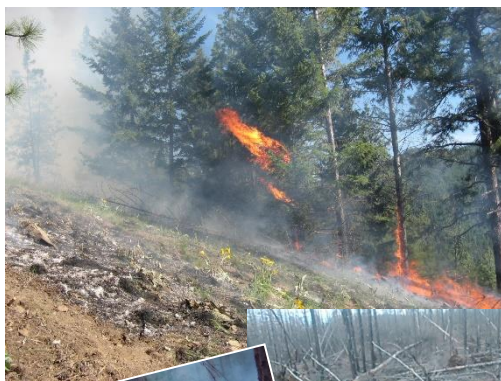
Ponomarev E.I., Kharuk V.I., Ranson J.K. (2016) Wildfires Dynamics in Siberian Larch Forests // Forests. 2016. N7, 125. P. 1-9. doi:10.3390/f7060125

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. 2017, Vol. 48, No 6, p. 507-512. doi: 10.1134/S1067413617060042





## От мониторинга к прогнозированию



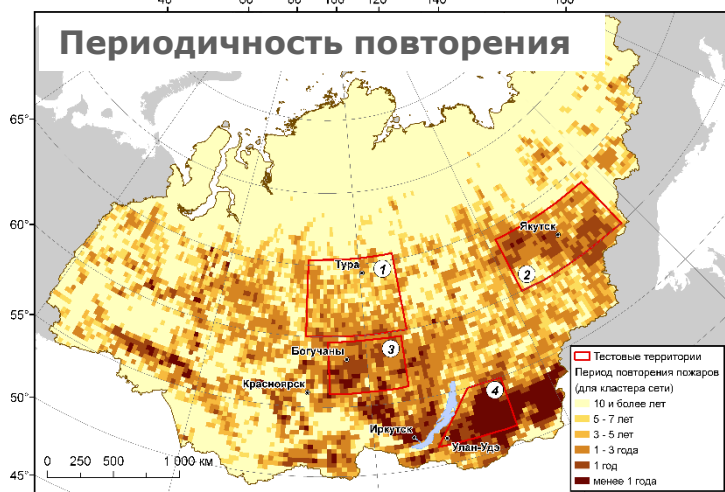
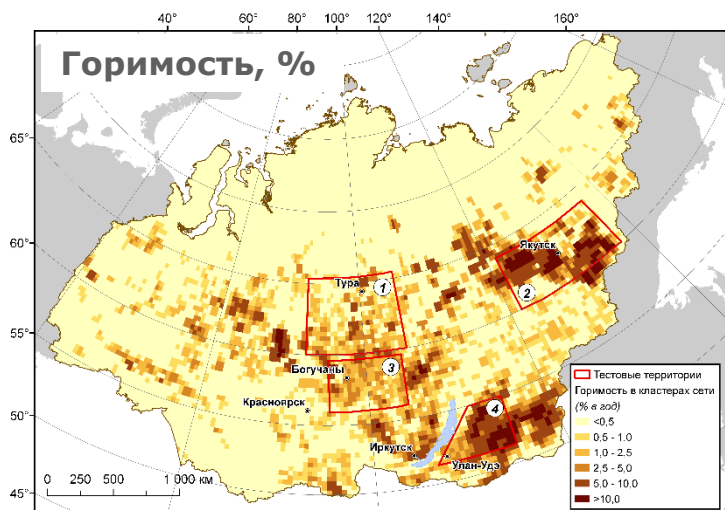
Для минимизации экологических, экономических потерь и исключения угрозы местному населению проблема лесных пожаров должна рассматриваться комплексно, в том числе важно иметь методики оперативной регистрации и прогнозирования интенсивности пожара.

Оценки **энергетических** параметров активной зоны должны дополнить атрибутивные свойства регистрируемых пожаров.

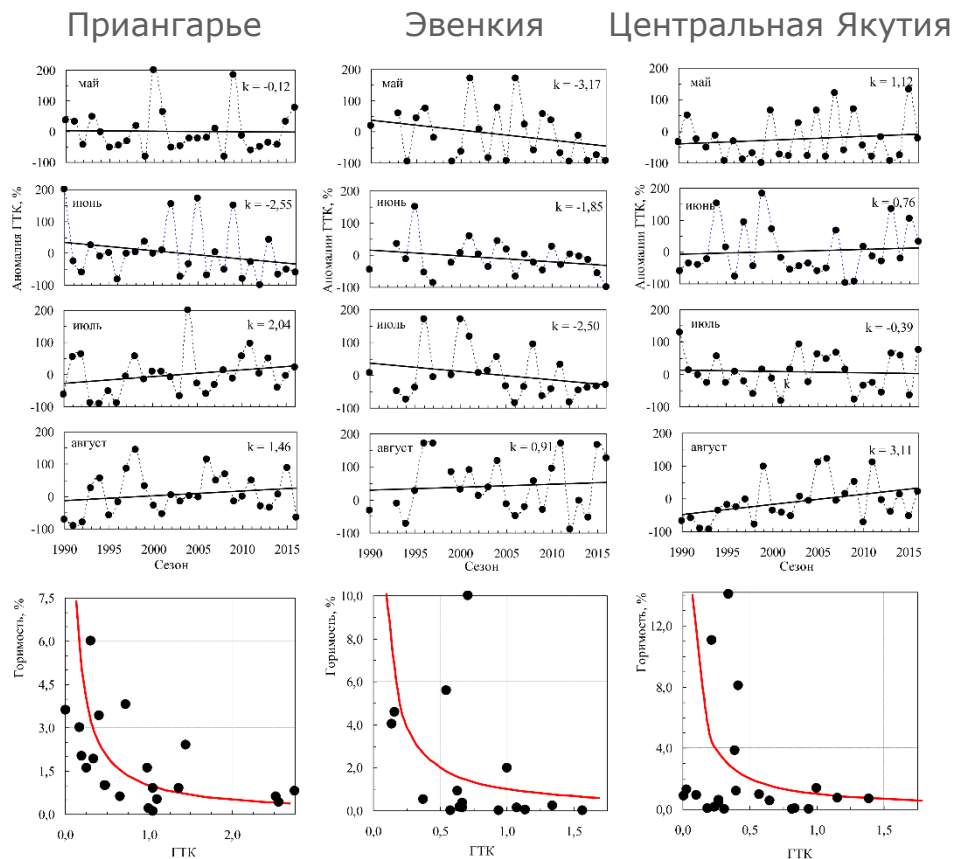
Направления проведения исследований:

- геопространственный анализ горимости и пожарные режимы;
- анализ фактических данных для оценки и прогнозирования характерных скоростей распространения тактических элементов пожара (динамика кромки, площади, удельная скорость выгорания);
- прогноз интенсивности горения и вероятности реализации верховых пожаров;
- адаптированные методы дистанционной оценки количества сгорающего ЛГМ, пожарные эмиссии;
- прогноз последствий пожара в зависимости от интенсивности горения, физико-географических условий района, типа леса и т.д.

# Геопространственный анализ горимости лесов Сибири



## Аномалии гидротермического показателя (ГТК)

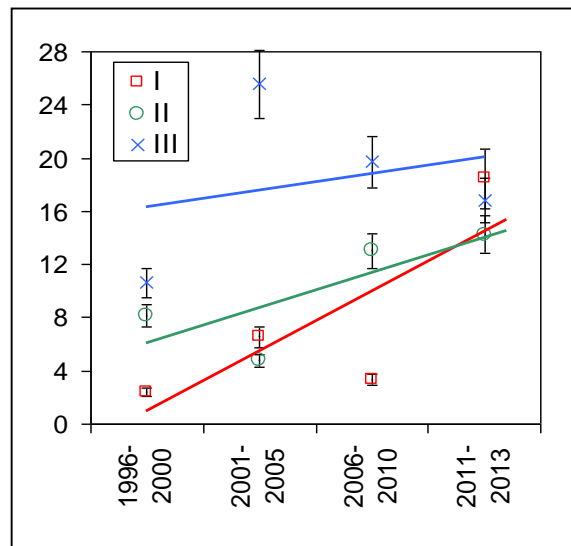
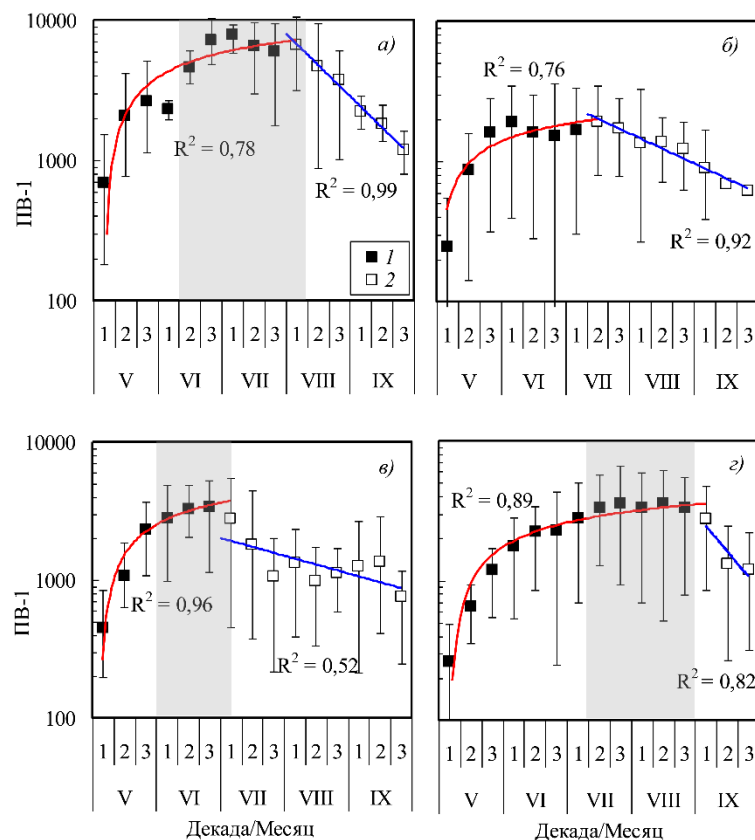


Зависимость «Горимость – ГТК»

Пономарев Е.И. и др. Горимость лесов Сибири в контексте межсезонной вариации уровня тепло и влагообеспеченности // *Метеорология и гидрология*. 2018 (В печати).



## Прогнозирование пожарной опасности по условиям погоды



Повторяемость пожаров в приближении линейного роста для регионов Сибири:

I – Центральная Якутия,  
 II – Приангарье, Эвенкия,  
 III – Прибайкалье.

Модельные сценарии пожарной опасности по условиям погоды:

- а) экстремальная пожарная опасность (I тип);
- б) низкая пожарная опасность (III тип);
- в) умеренная пожарная опасность (IIa тип / весенний);
- г) умеренная пожарная опасность (IIб тип / летний).

1 — стадия логарифмического нарастания; 2 — стадия спада. Y-погрешности показывают пределы вариации значений по многолетним данным. Полутоновыми прямоугольниками выделены характерные периоды экстремумов.

## Модельные сценарии пожарной опасности по условиям погоды

№	Сценарий/ характеристика уровня пожарной опасности (ПО)	Коэффициенты модели (см. рис. 3)		Вероятность реализации сценария P{E} в суб-регионах				Периодичность повторения в суб-регионах, лет				γ, % (много- летнее min—max)	
		логариф- мический рост 10 <sup>-3</sup>	скорость экспонен- циального спада	1	2	3		4	1	2	3		4
1	I/ экстремальная	3,15	-0,34	0,19	0,20	0,12	0,24	6 ± 1	4 ± 2	9 ± 2	5 ± 3	4,5—14,5	
2	IIa / умеренная, весенний	1,79	-0,10	0,38	0,57	0,16	0,36 *	0,57	4 ± 1	3 ± 1	7 ± 4	3 ± 1	0,5—1,5
3	IIb / умеренная, летний	1,39	-0,42			0,24							
4	III / низкая	0,74	-0,16	0,43	0,23	0,48	0,19	3 ± 1	4 ± 2	2 ± 1	7 ± 2	0,01—0,3	

\* вероятность реализации одного из двух событий по  $P\{E_1 \cup E_2\} = P\{E_1\} + P\{E_2\} - P\{E_1 \cap E_2\}$

Для **55%** территории Сибири период повторения пожаров составляет >10 лет.  
Показатель горимости в зависимости от реализуемого сценария пожарной опасности может меняться на 2 порядка величины — **0.1%** и **14.5%** (среднее для Сибири 1.19% для лесов запада Канады – 0.56% (deGroot et al., 2013).  
Вероятность реализации экстремального сценария ~ **18±5%**,  
Экстремальные погодные условия / массовые и экстремальные пожары: периодичность **7±4** лет.

## Многолетняя динамика отклика на пожарные воздействия

Послепожарные участки в  
лиственничниках кустарничково-  
зеленомошных. Эвенкия.

Запас напочвенного покрова до (**4.0 кг/м<sup>2</sup>**) и после (**0.5 кг/м<sup>2</sup>**) пожара. Сосняки Приенисейской Сибири (а, б),  
лиственничники Эвенкии (в, г, д)



2 года



15 лет



24 года

а)



б)



в)



г)

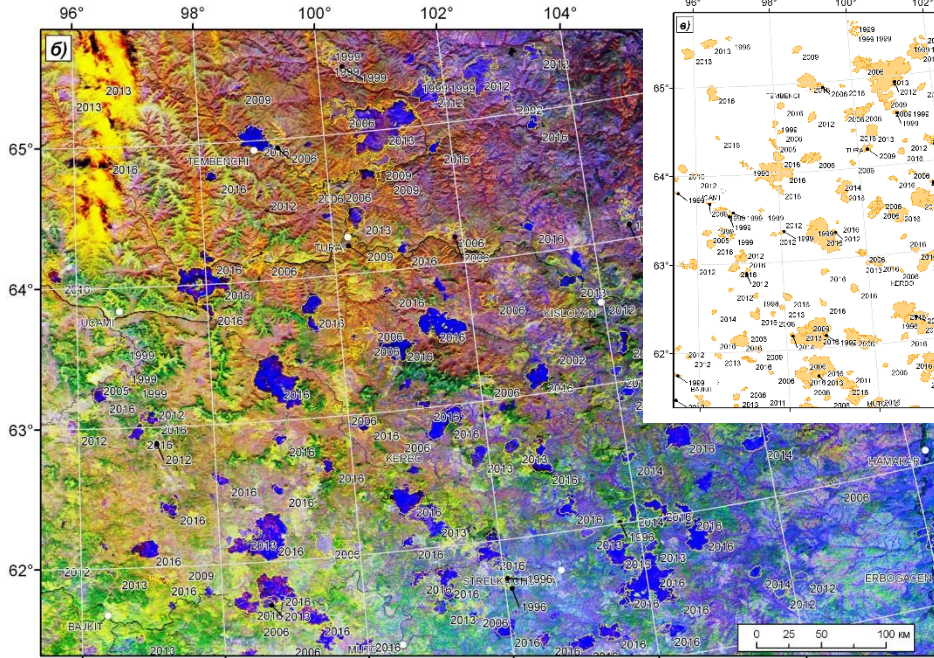


д)





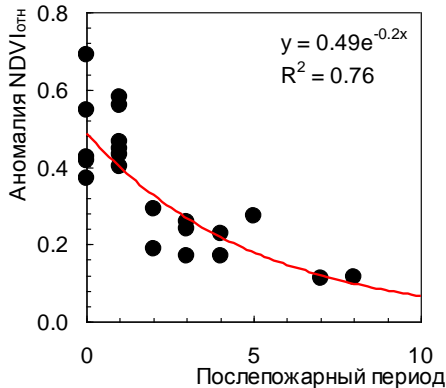
## Послепожарная динамика



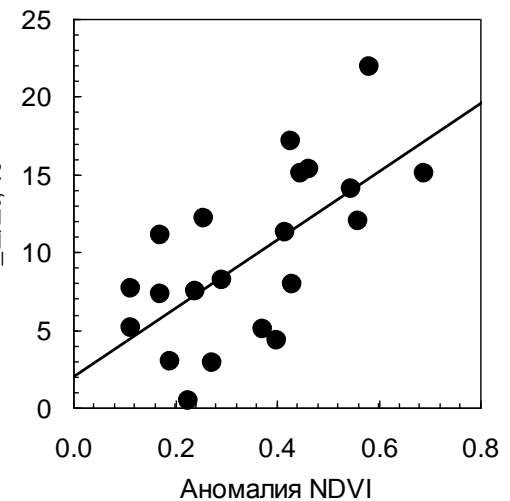
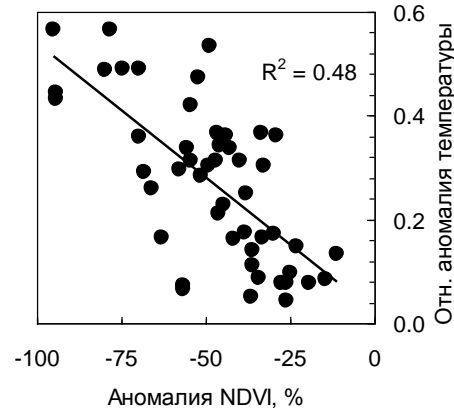
Нарушенность  
 лиственных лесов  
 Эвенкии. «Мозаичность»  
 территории при съемке в  
 тепловом диапазоне.

Относительное изменение условной глубины  
 протаивания ( $\Delta Z/Z_0$  в среднем  $\sim 9.7\%$ ,  
 варьирование **3–17%**).  
 Решение Стефана для уравнения  
 теплопроводности

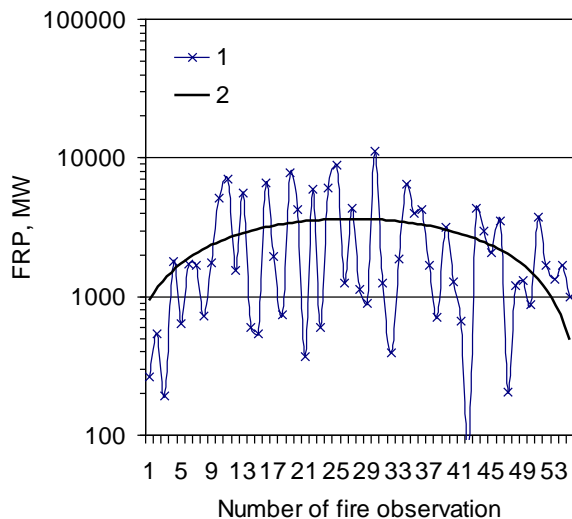
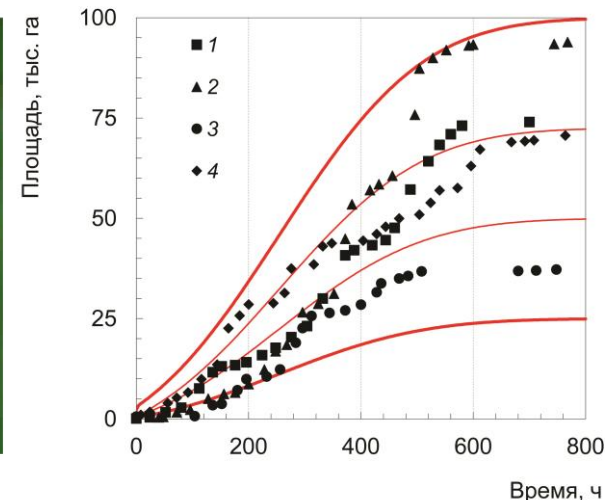
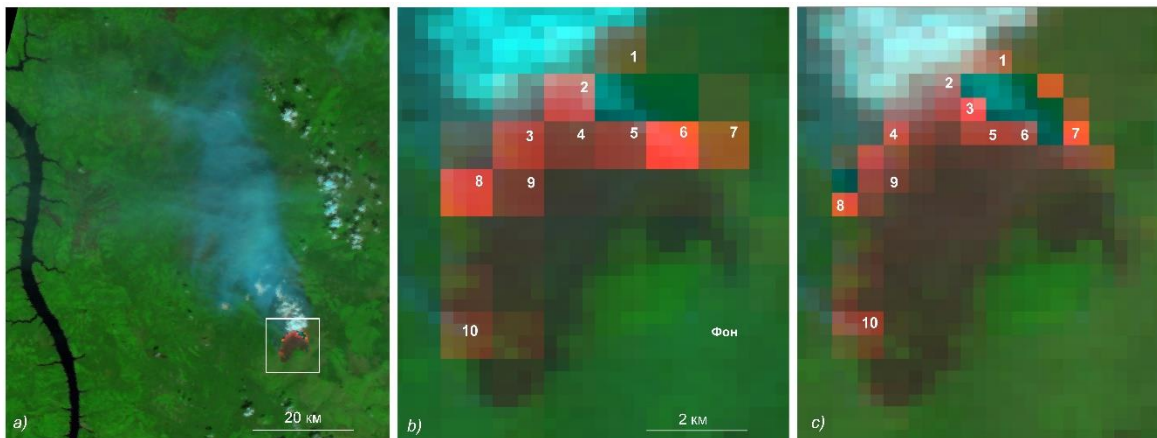
Динамика аномалии NDVI



Связь NDVI и температуры  
 поверхности



## Динамика параметров пожаров (модели и инструментальные измерения)



Для оценки мощности теплоизлучения от активной зоны пожара используются данные TERRA/Modis в диапазоне 4 мкм.

Показано, что доля FPR от интегральной мощности пожара может составлять величину ~15%.

Варьирование (на уровне 10–30%) обеспечивают:

- 1) сценарий протекания пожара (удельная скорость выгорания 0.01-0.1 кг/м<sup>2</sup>с, скорость распространения фронта пламени 0.01-0.1 м/с),
- 2) условия проведения съемки.

Стадии пожара:

- 1) начальная – 70–120 часов,
- 2) стадия экспоненциального роста площади – характерное время 150–275 часов,
- 3) логарифмическое затухание скорости приращения площади 45–65 часов.

Дисперсия ~ 40% от абсолютных значений. Динамика приращения площади пожара формализована модельными кривыми.

## Детектирование активных пожаров в верховой стадии

Пространственно временные совпадения спорадических максимумов FRP и локализации верхового горения

Предлагаемый подход тестировался на основе материала наземного и авиационного мониторинга пожаров в Красноярском крае 2014-2016 гг.

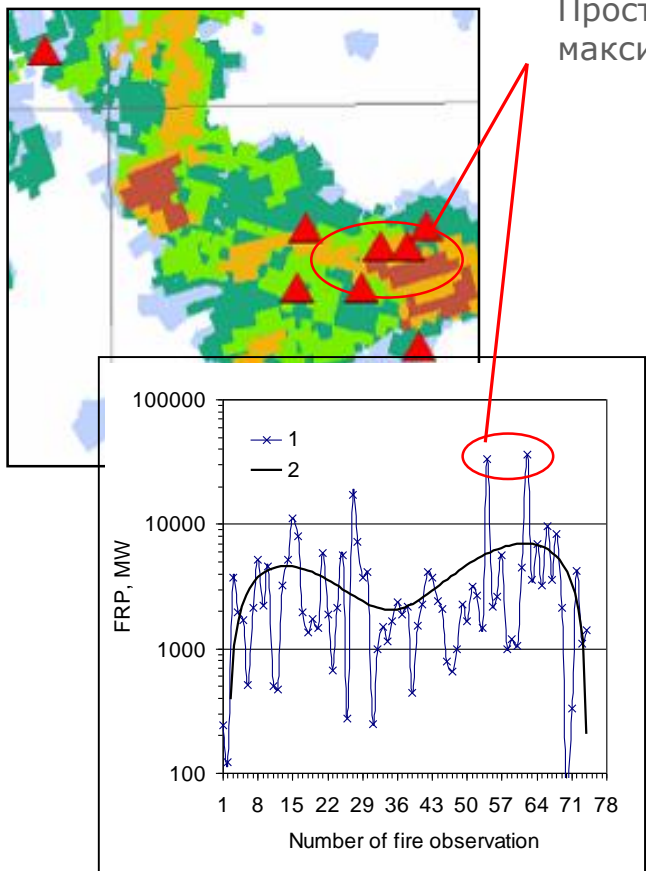
Критерий детектирования верховой стадии горения - порог  $2.5\sigma_{FRP}$  от среднего значения по полигону пожара.

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

Статистика для пожаров Сибири по материалам 2010–2016:

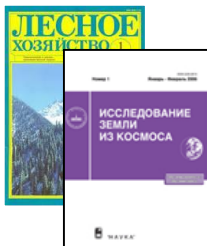
Доля лесных пожаров с участками экстремального теплоизлучения ежегодно составляет  $5.5 \pm 1.2\%$  от общего числа.

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



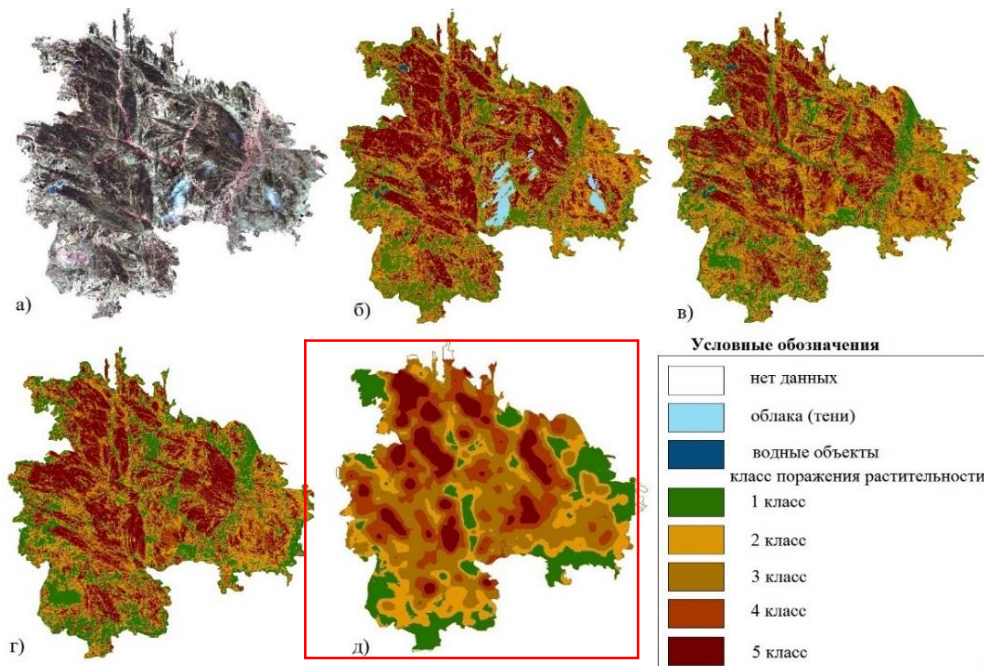
Пономарев Е.И., Иванов В.А., Швецов Е.Г. (2014) Детектирование верховых лесных пожаров по данным съемки Terra/Modis // Лесное хозяйство. 2014, №2. – С. 32 – 33.

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.





## Оценка степени пожарного воздействия на растительность



Пример классификации участка, пройденного огнем:

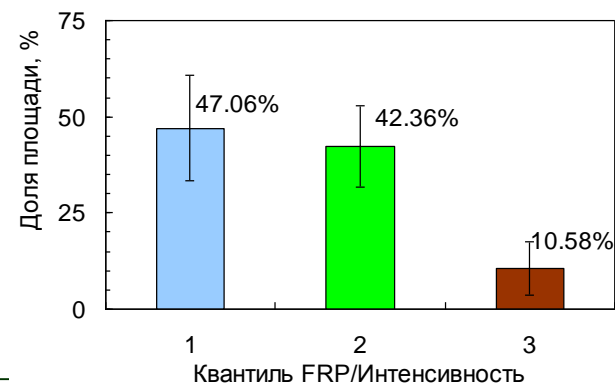
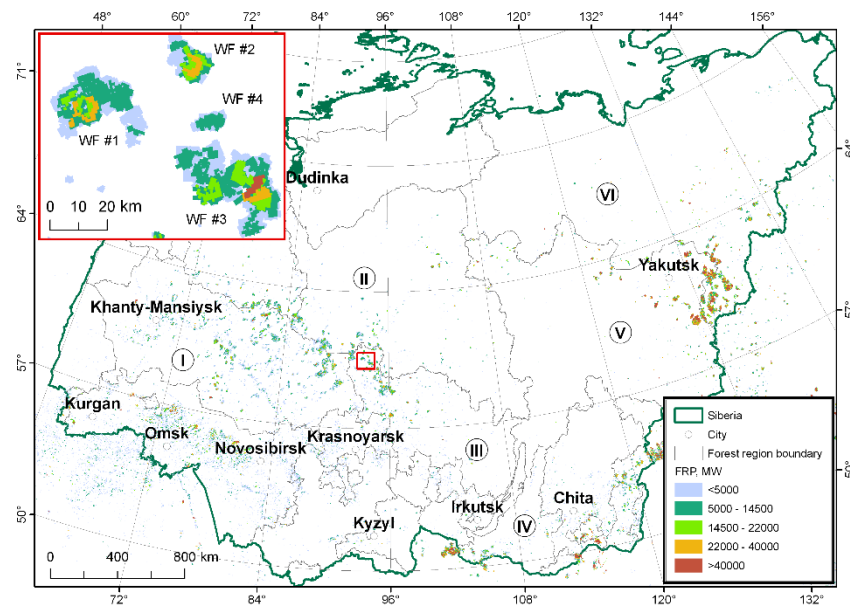
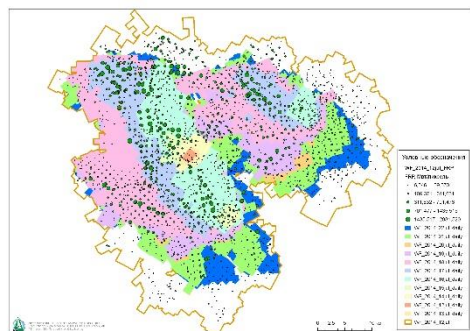
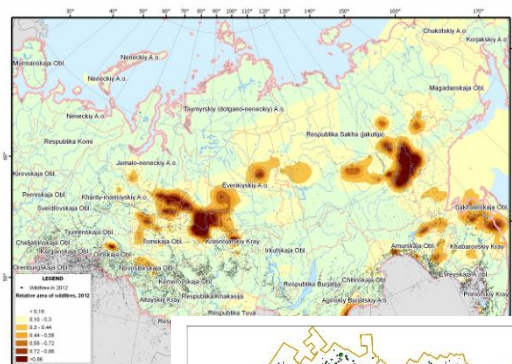
- а) исходный снимок
- б) автоматическая классификация
- в) NDVI
- г) dNBR
- д) FRP – классификация зон максимальной интенсивности

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.

Пономарев Е.И. (2014) Классификация пожаров в Сибири по мощности излучения на основе показателя FRP по данным TERRA/Modis // Исслед. Земли из космоса. 2014, №3. – С.56 – 64. doi: 10.7868/S0205961414020080

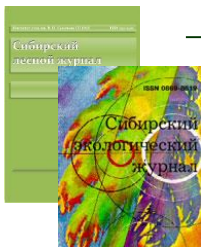
## Мониторинг степени воздействия на растительность



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

Швецов Е.Г., Пономарев Е.И. (2015) Оценка влияния внешних условий на мощность теплоизлучения от лесных пожаров по данным спутникового мониторинга // Сибирский экологический журнал, 2015, №3, с. 413 – 421. DOI: 10.15372/SEJ20150308

Пономарев Е. И., Харук В. И., Якимов Н. Д. (2017) Результаты и перспективы спутникового мониторинга природных пожаров Сибири // Сибирский лесной журнал. 2017. №5. doi: 10.15372/SJFS20170504.



## Адаптированная модель оценки количества сгорающих ЛГМ

Оценка массы растительных  
горючих материалов,  
сгоревших при пожаре (кг)

=

Площадь, пройденная огнем ( $m^2$ )  $\times$   
коэффициент полноты сгорания ( $\beta$ )  $\times$   
допожарный запас растительных горючих материалов ( $кг/m^2$ )



Методика классификации полигона пожара  
по теплоизлучению активной зоны /  
дифференциальный учет количественных  
характеристик для участков различной  
интенсивности горения



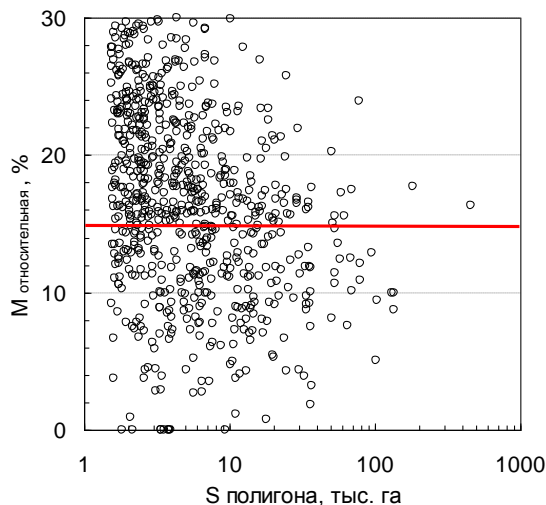
Адаптированный метод оценки массы  
растительных горючих материалов,  
сгоревших при пожаре (кг)

Уточнение на **~ 5.7–17.5%**

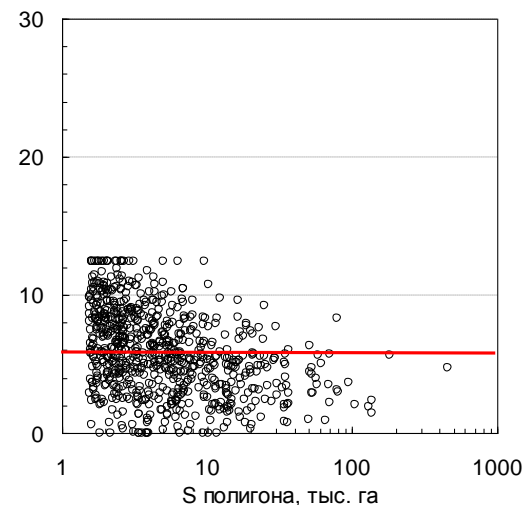
(среднее для данных о пожарах в  
лиственничниках Эвенкии в 2002 –  
2016 гг.)



Методика дифференциального учета  
пожарных эмиссий



Относительная величина  
коррекции сгоревшей массы  
ЛГМ **17.5%**  
Полнота сгорания  $\beta = 0.5$



Относительная величина  
коррекции сгоревшей массы  
ЛГМ **5.7%**  
Полнота сгорания  $\beta = 0.65$



## Основные результаты:

1. Собран и актуализируется банк данных пожаров растительности на территорию Сибири. Выявлены тренды показателей горимости лесов Сибири в современных условиях и степень связи с метеорологическими аномалиями.
2. Проведена геопространственная классификация территории Сибири на уровне суб-регионов по частоте повторения экстремальных пожаров в связи с локальными аномалиями показателя тепло- и влагообеспеченности. Предложены модельные сценарии развития пожарной опасности по условиям погоды. Дана оценка вероятности реализации экстремального пожарного сценария по суб-регионам Сибири (14–18%).
3. Адаптирован к условиям пожаров Сибири метод регистрации мощности теплоизлучения от зоны активного горения. Показано, что доля лесных пожаров в Сибири с участками экстремального теплоизлучения ежегодно составляет  $5.5 \pm 1.2\%$  от общего числа. Суммарная площадь лесов, пройденных высокоинтенсивным горением, включая верховые пожары, составляет не менее 8.5% в год.
4. В первом приближении получены модельные параметры пожаров, включая характеристики тактических элементов пожара и энергетические характеристики активной зоны позволяющие перейти к этапу моделирования удельной скорости выгорания ЛГМ, дифференциальному учету эмиссий и уточнению глобального баланса углерода с учетом горимости лесов Сибири.



# Спасибо за внимание!

Исследования проведены в  
Институте леса им. В. Н. Сукачева СО РАН, ФИЦ КНЦ СО РАН  
при поддержке РФФИ, Правительства Красноярского края,  
Красноярского краевого фонда поддержки научной и научно-технической деятельности,  
проект №17-41-240475.

