XXIV международная конференция
«Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса»,
9-13 ноября 2026

Оценка радиационной энергии пожаров по спутниковым данным и её использование для расчета эмиссий углерода на территории Сибири

Е.Г. Швецов

ФИЦ КНЦ СО РАН, Красноярск, 660036

Работа выполнена в рамках государственного задания FWES-2024-0027 и FWES-2025-0025 ФИЦ КНЦ СО РАН.

Задачи исследования

Основной целью работы являлась оценка радиационной энергии пожаров на территории Сибири по данным систем MODIS и VIIRS, а также расчет пирогенных эмиссий на основе этих оценок и сравнение их с существующими базами данных эмиссий.

1. Моделирование суточного цикла пожарной активности;

2. Расчет радиационной энергии пожаров по данным систем MODIS и VIIRS;

3. Оценка пирогенных эмиссий углерода через оценки радиационной мощности и сравнение с глобальными базами данных эмиссий;

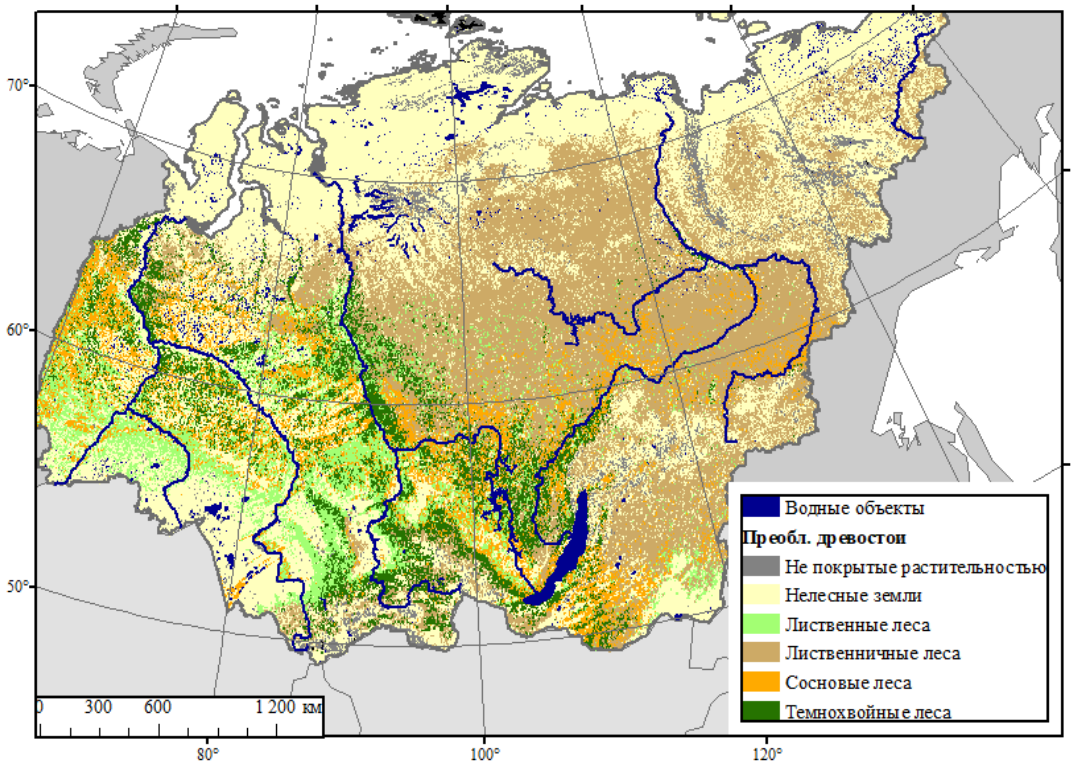
Район исследований

Рассматривалась территория Сибири в границах примерно 50 – 75° с.ш. и 60 – 160° в.д. Общая площадь региона около $9{,}5\times10^6$ км^2.

Преобладающие лесообразующие породы:

лиственница (*Larix sibirica, L. gmelini*) (около 55% лесной площади района);

сосна (*Pinus sylvestris*) (14%);
темнохвойные породы: кедр (*Pinus sibirica*), пихта (*Abies sibirica*) ель (*Picea obovata*) – около 13% площади;
смешанные леса с преобладанием лиственных пород (*Betula spp., Populus tremula*) (18%).



Использованные данные

MCD64A1 → Расположение и время появления гарей

MOD14/MYD14 → Радиационная мощность пожаров

Площади гарей
Период: 2003 – 2025 годы, векторный полигональный слой, сформированный на основе продукта гарей MODIS MCD64A1

Продукт тепловых аномалий MODIS (MOD14/ MYD14)
Период: 2003 – 2025 годы, пространственное разрешение – 1000 м

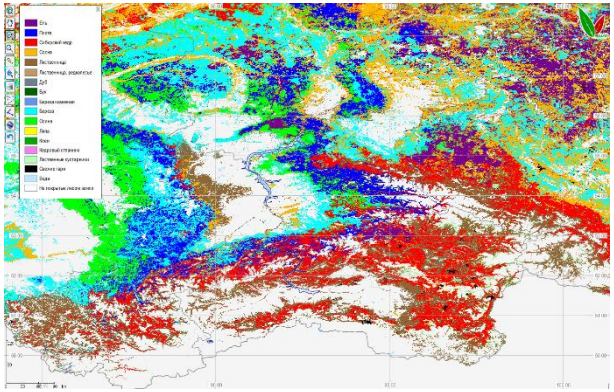
VNP14/VJ114 и VNP14IMG/ VJ114IMG → Радиационная мощность пожаров

Продукт тепловых аномалий VIIRS (VNP14/ VJ114)
Период: 2018 – 2025 годы, пространственное разрешение – 750 м

Продукт тепловых аномалий VIIRS (VNP14IMG/ VJ114IMG)
Период: 2018 – 2025 годы, пространственное разрешение – 375 м

Использованные данные

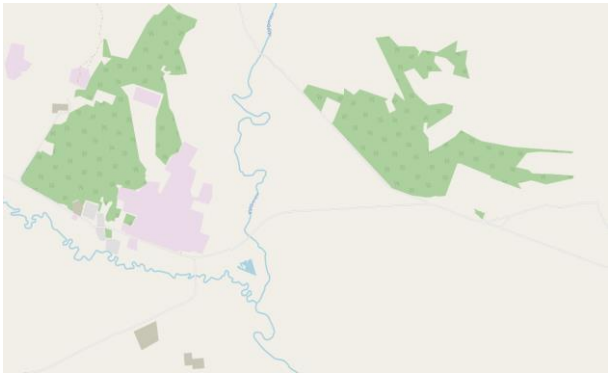
Карта растительности



Преобладающие типы древостоев

Преобладающие породы древостоев на территории района исследования определялись с помощью карты, разработанной в ИКИ РАН и доступной через сервис VEGA (http://pro-vega.ru/maps/)

Карты Google Earth / OSM



Антропогенные источники тепловых аномалий

Исключались «тепловые аномалии», связанные с антропогенной деятельностью, в частности, расположенные на территории населенных пунктов, а также в районах добычи нефти и газа.

Радиационная мощность пожара (FRP)

• Мгновенная скорость выделения энергии пожаром – радиационная мощность пожара (Fire Radiative Power, FRP) (МВт);

• Радиационная энергия пожара (Fire Radiative Energy, FRE) – это интеграл скорости выделения энергии в процессе горения (МДж).

В последних версиях продуктов тепловых аномалий MODIS/VIIRS для расчета FRP используется соотношение

$$FRP = \frac{\sigma \cdot A_{pix}}{a} \cdot (L_{fire} - L_{bg}\Big)$$

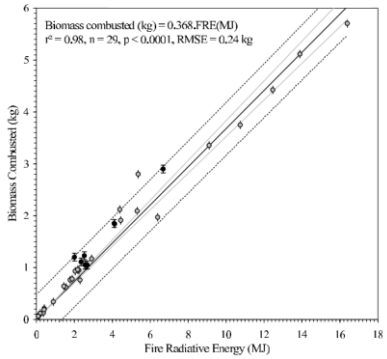
где σ – постоянная Стефана-Больцмана; A_{pix} – реальная площадь пикселя на Земле с учетом угла обзора; a – специфический для спектрального канала MODIS/VIIRS коэффициент чувствительности; L_{fire} и L_{bg} – спектральная плотность энергетической яркости пикселя с пожаром и окружающего фона соответственно.

Радиационная энергия пожара (FRE)

Идея использования FRE для оценки количества сгоревшей биомассы была впервые предложена [*Kaufman et al.*, 1996] и получила развитие в работах [*Wooster,* 2002] и [*Wooster et al.*, 2005].

• Интегрирование FRP по времени действия пожара позволяет получить FRE, которая может использоваться для оценки количества сгоревшей биомассы

• Используя эмиссионный коэффициент (Ec) возможно расчитать эмиссии от пожара.



Соотношение между радиационной энергией и количеством сгоревшей биомассы описывается с помощью линейной модели. Рисунок заимствован из работы [*Wooster et al.*, 2005].

Kaufman Y.L., Remer R., Ottrnar D., Ward L., Rong-R R., Kleidman R., Fraser R., Flynn L., McDougal D., G. Shelton, Relationship between remotely sensed fire intensity and rate of emission of smoke: SCAR-C experiment // in Global Biomass Burning, ed. J. Levine, 685-696, MIT Press, Mass., 1996

Wooster M.J. Small-scale experimental testing of fire radiative energy for quantifying mass combusted in natural vegetation fires // Geophys. Res. Lett., 2002, 29 (21), 2027

Wooster M.J., Roberts G., and Perry G.L.W. 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 // Geophys. Res. Lett., 2005, 10, D24311

Радиационная энергия пожара (FRE)

Оценка радиационной энергии пожара по мгновенным измерениям радиационной мощности.

1. Интегрирование по методу трапеций:

$$FRE_{trapz} = \sum_{i=0}^{N-1} \frac{FRP_{i+1} + FRP_i}{2}(t_{i+1} - t_i), \quad (1)$$

FRP_i – мощность теплоизлучения пожара в момент времени i, МВт; t_i – время i-го наблюдения

2. Моделирование суточного цикла пожарной активности с использованием гауссовой кривой

$$FRE_{gauss} = \int_0^{24} FRP_{back} + \left(FRP_{peak} - FRP_{back}\right) e^{-\frac{(t-h)^2}{2\sigma^2}} dt, \quad (2)$$

FRP_{back}, FRP_{peak} – величина фоновой (ночной) и максимальной FRP, соответственно, МВт; t – время, ч; h – время, когда радиационная мощность пожара максимальна, ч; σ – величина стандартного отклонения, характеризующая продолжительность пожарной активности, ч.

Оценка пирогенных эмиссий

Для расчета количества сгоревшей сухой биомассы по оценкам радиационной энергии пожаров, использовались ранее полученные экспериментально коэффициенты 0,368 [*Wooster et al.*, 2005] и 0,453 [*Freeborn et al.*, 2008]. Далее, для расчета эмиссий углерода использовались коэффициенты, приводимые в ранее опубликованных работах [*Andreae, Merlet*, 2001; *Akagi et al.*, 2011] для бореальных лесов и нелесной растительности.

Для сравнения полученных оценок пирогенных эмиссий углерода использовались четыре глобальных информационных продукта: GFED v4.1s, FEER v1.0-G1.2, FINN v2.5, а также QFED v2.5-r1.

Если в глобальном продукте не были приведены данные по общим эмиссиям углерода, а только данные по отдельным компонентам (продукты FINN и QFED), то эмиссии углерода вычислялись по формуле

$$f(C) = \frac{12 \times f(CO_2)}{12 + 2 \times 16} + \frac{12 \times f(CO)}{12 + 16} + \frac{12 \times f(CH_4)}{12 + 4 \times 1} + f(OC) + f(BC),$$

Akagi S.K., Yokelson R.J., Wiedinmyer C., et al. Emission factors for open and domestic biomass burning for use in atmospheric models // Atmos. Chem. Phys., 2011, Vol. 11. pp. 4039–4072.

Andreae M.O., Merlet P. Emission of trace gases and aerosols from biomass burning // Global Biogeochem. Cycles, 2001, Vol. 15(4), pp. 955 – 966.

Freeborn P.H., Wooster M.J., Hao W.M., et al. Relationships between energy release, fuel mass loss, and trace gas and aerosol emissions during laboratory biomass fires // J. Geophys. Res., 2008, Vol. 113, DO1301.

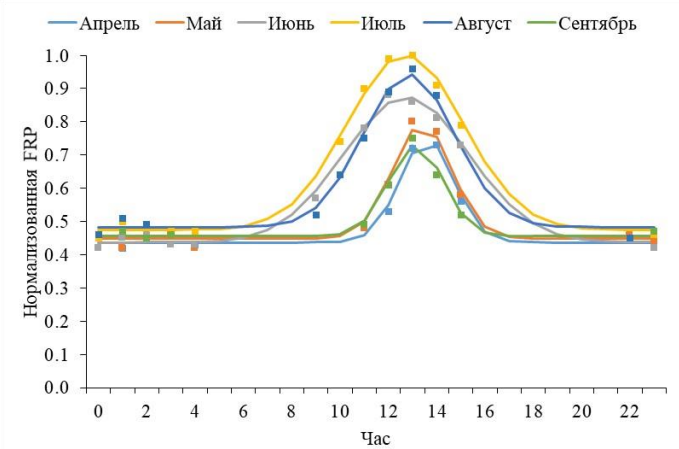
Wooster M.J., Roberts G., and Perry G.L.W. Retrieval of biomass combustion rates and totals from fire radiative power observations: FRP derivation and calibration relationships between biomass consumption and fire radiative energy release // Geophys. Res. Lett., 2005, 10, D24311

Суточный цикл FRP

Параметризация суточного цикла FRP с использованием архива наблюдений MODIS за 2003 – 2025 годы с использованием гауссовой функции

$$FRP(t) = FRP_{back} + \left(FRP_{peak} - FRP_{back}\right)e^{-\frac{(t-h)^2}{2\sigma^2}}$$

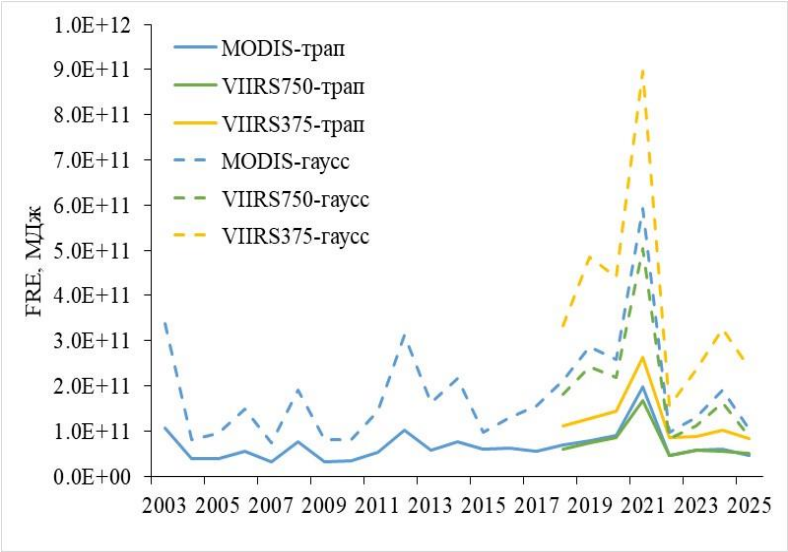
Оценка параметров суточного цикла выполнялась отдельно для каждого месяца (учёт изменения продолжительности светового дня в течение пожарного сезона).



Суточный цикл радиационной мощности пожаров, аппроксимированный с помощью гауссовой функции.

Для параметризации использовались только данные MODIS, т.к. для системы VIIRS отсутствуют утренние и вечерние проходы. Для данных VIIRS использовались параметры суточного цикла, рассчитанные по данным MODIS.

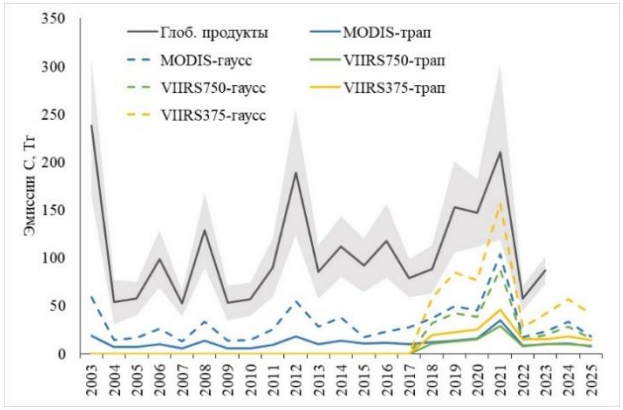
Радиационная энергия пожаров в Сибири



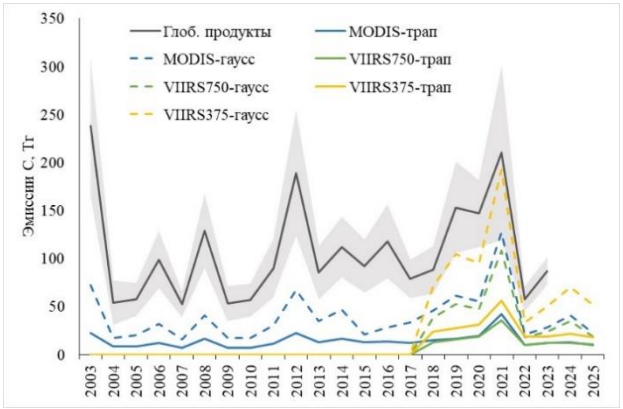
Оценки радиационной энергии пожаров на территории Сибири за 2003 – 2025 гг. по данным систем MODIS и VIIRS.

- Среднее значение FRE пожаров составило от $6{,}6\times10^{10}$ до $1{,}8\times10^{11}$ МДж за 2003 – 2025 при использовании соотношений (1) и (2), соответственно.
- Оценки, полученные по методу (2) (учет суточного цикла пожарной активности) существенно (в 2 – 3 раза) превышали оценки, полученные с использованием соотношения (1).
- Оценки FRE, полученные по данным VIIRS (750 м), были примерно на 9% ниже оценок по данным MODIS.
- Оценки FRE по данным VIIRS (375 м) были примерно на 68% выше по сравнению с данными MODIS.

Пирогенные эмиссии углерода на территории Сибири



Использован коэффициент 0,368 [*Wooster et al.*, 2005]



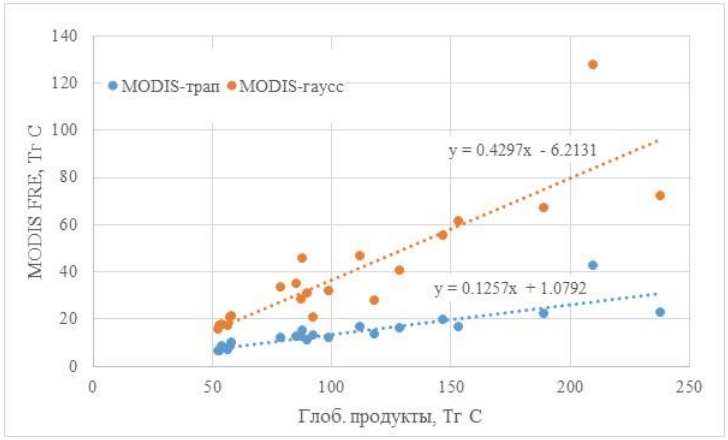
Использован коэффициент 0,453 [*Freeborn et al.*, 2008]

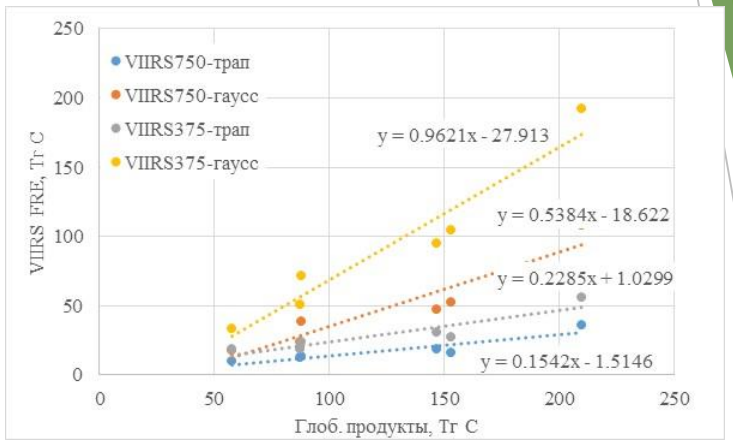
Сравнение полученных оценок эмиссий и глобальных продуктов показало их высокую корреляцию ($R^2 > 0,72$) (MODIS, 2003 – 2023) и $R^2 > 0,8$ (VIIRS, 2018 – 2023).

Оценки эмиссий, рассчитанные по FRE, были существенно ниже, чем усредненные значения глобальных продуктов.

Черная линия на рисунках соответствует среднему значению эмиссий по данным глобальных продуктов, а серая область – одному стандартному отклонению.

Сравнение с глобальными продуктами





Сравнение полученных оценок эмиссий и среднего значения глобальных продуктов

Отношение пирогенных оценок, полученных двумя методами с использованием данных MODIS и VIIRS к оценкам глобальных баз эмиссий. Среднее значение глобальных баз эмиссий взято за 100%.

Данные		MODIS 1000 м		VIIRS 750 м		VIIRS 375 м	
Метод		Трап.	Гаусс	Трап.	Гаусс	Трап.	Гаусс
Коэф.	0,368*	11,4%	32,3%	11,5%	32,5%	19,6%	62,5%
	0,453**	13,9%	37,1%	14,3%	40,0%	23,8%	74,1%

* Wooster M.J., Roberts G., and Perry G.L.W. 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 // Geophys. Res. Lett., 2005, 10, D24311
** Freeborn P.H., Wooster M.J., Hao W.M., et al. Relationships between energy release, fuel mass loss, and trace gas and aerosol emissions during laboratory biomass fires // J. Geophys. Res., 2008, Vol. 113, DO1301.

XXIV международная конференция
«Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса»,
9-13 ноября 2026

Спасибо за внимание!

Работа выполнена в рамках государственного задания FWES-2024-0027 и FWES-2025-0025 ФИЦ КНЦ СО РАН.