

Опыт использования данных MODIS при решении задач мониторинга природных пожаров и их последствий

Лупян Е.А. (1), Барталев С.А. (1), Балашов И.В. (1), Бурцев М.А. (1), Котельников Р.В. (2),
Лозин Д.В. (1), Мазуров А.А. (1), Сенько К.С. (1), Стыценко Ф.В. (1)

(1) Институт Космических Исследований РАН

(2) Филиал ФБУ ВНИИЛМ "Центр лесной пирологии"

Двадцать третья международная конференция
"СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ ИЗ КОСМОСА"

Институт космических исследований РАН

Москва

10 ноября 2025 г.

Основная информация о пожарах и их последствиях, получаемая на основе данных прибора MODIS

- Информация об отдельных участках горения (горячих точках)
- Информация о числе пожаров (действующих и завершившихся)
- Оценки площади, пройденный огнем, на основе наблюдений (детектирования действующих пожаров)
- Оценки площади, пройденной огнем, на основе анализа постпожарных изменений растительного покрова
- Оценки повреждений лесов на основе анализа их постпожарных изменений
- Оценки повреждений лесов на основе анализа наблюдаемой интенсивности горения

Преимущества и недостатки информации об активном горении, полученной на основе данных MODIS

Основной недостаток

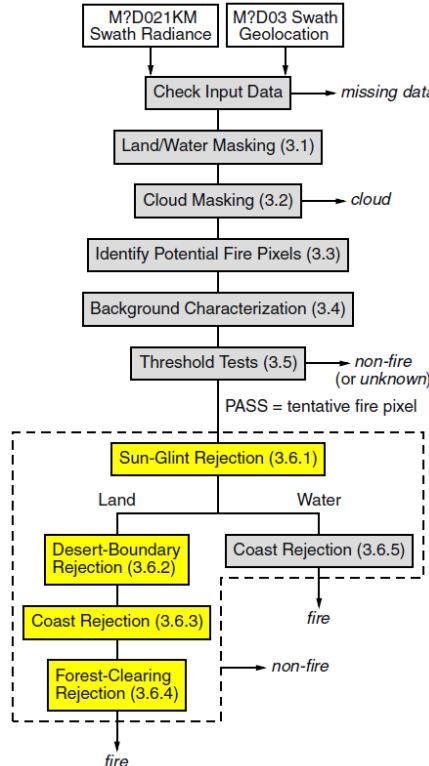
- Информация получена в основном по данным низкого пространственного разрешения (1 км).*

Преимущества

- Достаточно высокая частота наблюдения (несколько раз в сутки)*
- Достаточно надежные алгоритмы детектирования пожаров*
- Наличие однородных рядов наблюдений (с 2001 года)*
- Наличие полностью автоматизированных технологий детектирования пожаров и восстановления их характеристик*

Основные методы детектирования участков горения и оценки интенсивности горения

Алгоритм детектирования участков горения MOD14



Одним из наиболее устойчивых и надежных алгоритмов детектирования пожаров по спутниковым данным является алгоритм **MOD14**, рассчитанный на работу с данными прибора **MODIS**, установленного на спутниках **TERRA** и **AQUA**.

Набор каналов MODIS, используемых в MOD14

Channel number	Central wavelength (μm)	Purpose
1	0.65	Sun glint and coastal false alarm rejection; cloud masking.
2	0.86	Bright surface, sun glint, and coastal false alarm rejection; cloud masking.
7	2.1	Sun glint and coastal false alarm rejection.
21	4.0	High-range channel for active fire detection.
22	4.0	Low-range channel for active fire detection.
31	11.0	Active fire detection, cloud masking, forest clearing rejection.
32	12.0	Cloud masking.

Считается, что для участков горения более 5 га алгоритм дает 1,2% ложных тревог и 5% попусков (для версии данных MC6)

Схема оценки интенсивности горения, использующаяся в настоящее время при работе с данными MODIS

Оценка Fire Radiative Power (FRP) по данными MODIS

$$FRP = \frac{A_{pix}\sigma}{a\tau_4} (L_4 - \bar{L}_4)$$

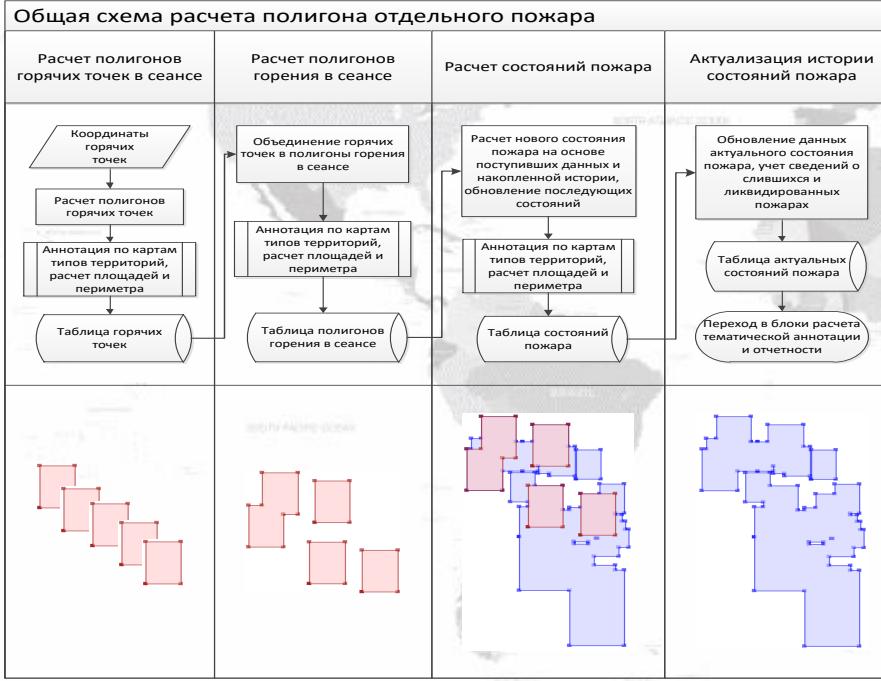
Wooster M. J., Zhukov B., Oertel D. Fire radiative energy for quantitative study of biomass burning: derivation from the BIRD experimental satellite and comparison to MODIS fire products, Remote Sensing of Environment, 2003, No. 86, pp. 83–107.

где L_4 - энергетическая яркость термически активного пикселя (цели) в канале 21 радиометра MODIS $\lambda \approx 4$ мкм, \bar{L}_4 - энергетическая яркость фона в том же спектральном диапазоне, A_{pix} - площадь пикселя MODIS (которая варьируется как функция угла сканирования), σ - постоянная Стефана-Больцмана ($5.6704 * 10^{-8}$ Вт * м $^{-2}$ К $^{-4}$), τ_4 - коэффициент прохождения 21 канала MODIS в атмосфере и a - эмпирическая постоянная, зависящая от прибора. Для MODIS $a = 3.0 * 10^{-9}$ Вт * м $^{-2}$ ср $^{-1}$ мкм $^{-1}$ К $^{-4}$. τ_4 просто присваивается значение 1, в формулу она включена для правильной атмосферной коррекции в следующем приближении.

Технология оценки площадей, пройденных пожарами

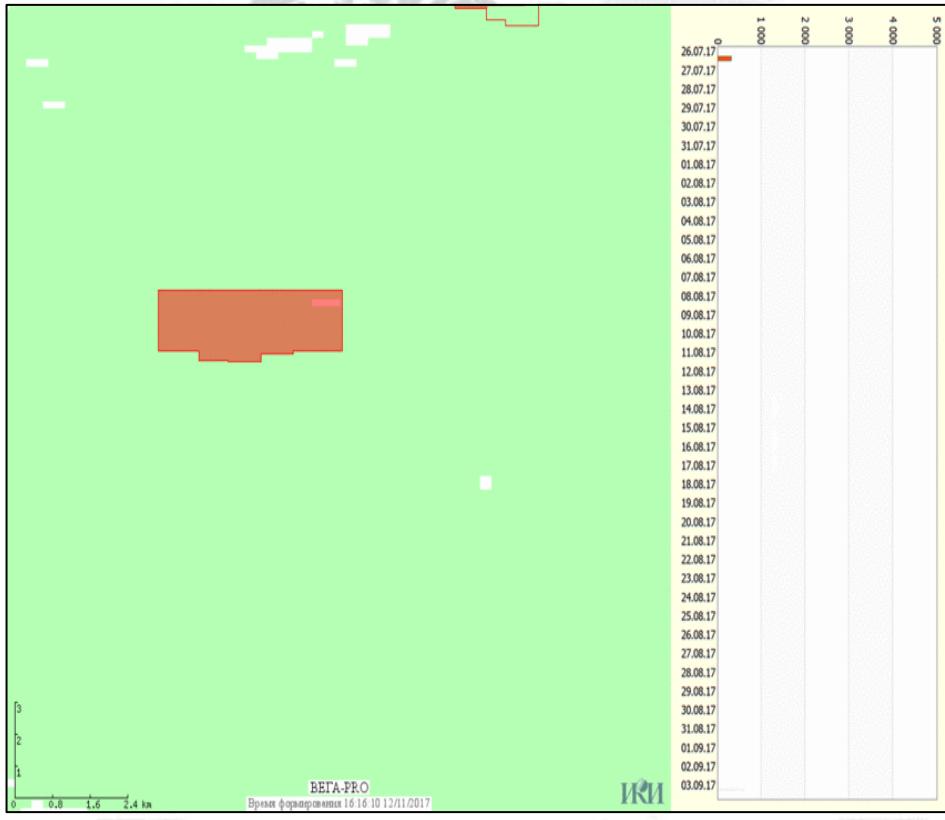
Автоматизированная технология формирования и мониторинга динамики пожаров

Формирование объекта «пожар»



- Объект «Пожар» это полигон, состоящий из набора детектированных горячих точек, объединённых учетом временной и пространственной «близости»
- Полигоны проходят аннотацию по тематическим картам, в т.ч. картам лесов
- Полученные данные позволяют оценивать пройденные огнем площади по различным территориям и типам наземного покрова

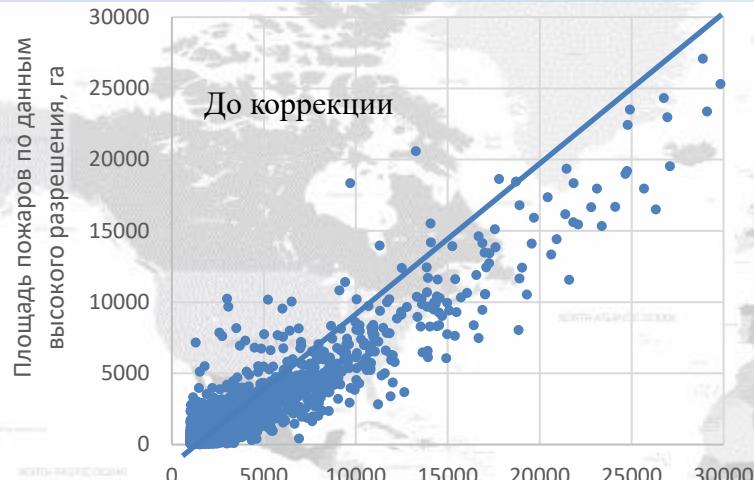
Отслеживание развития пожара на всех стадиях его развития



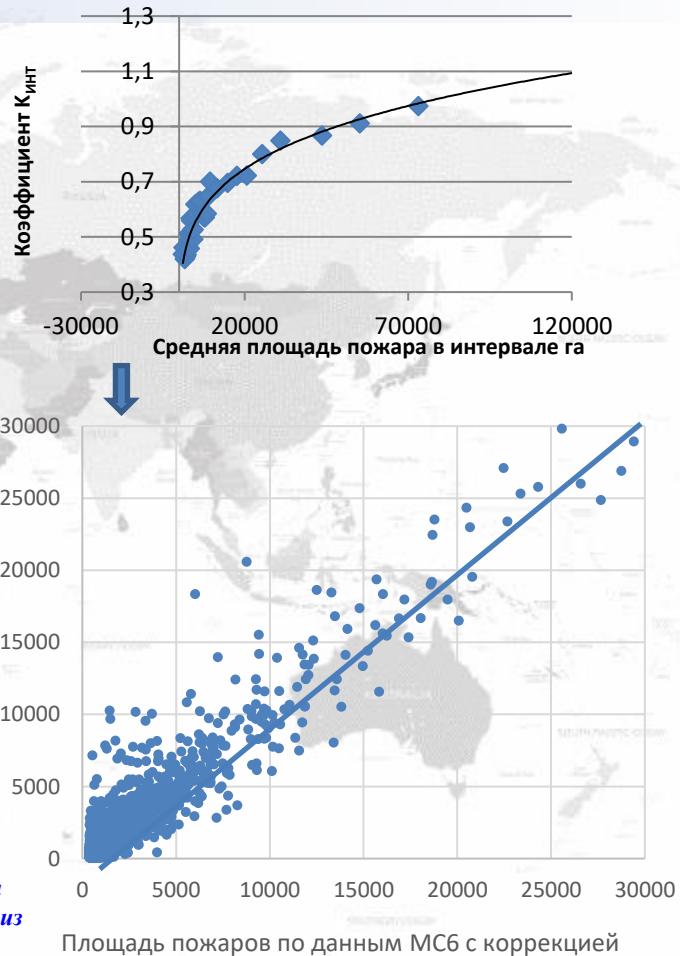
Данные об отдельных пожарах являются основой для формирования информации по конкретным территориям и зонам мониторинга. В том числе о:

- числе пожаров
- площадях, пройденных огнем
- площадях, покрытых лесом, пройденных огнем
- площадях с различными типами леса, пройденных огнем
- точках возникновения пожаров
- пространственных распределениях пожаров
- ...

Метод оперативной оценки площадей, пройденных огнем, на основе детектирования активного горения



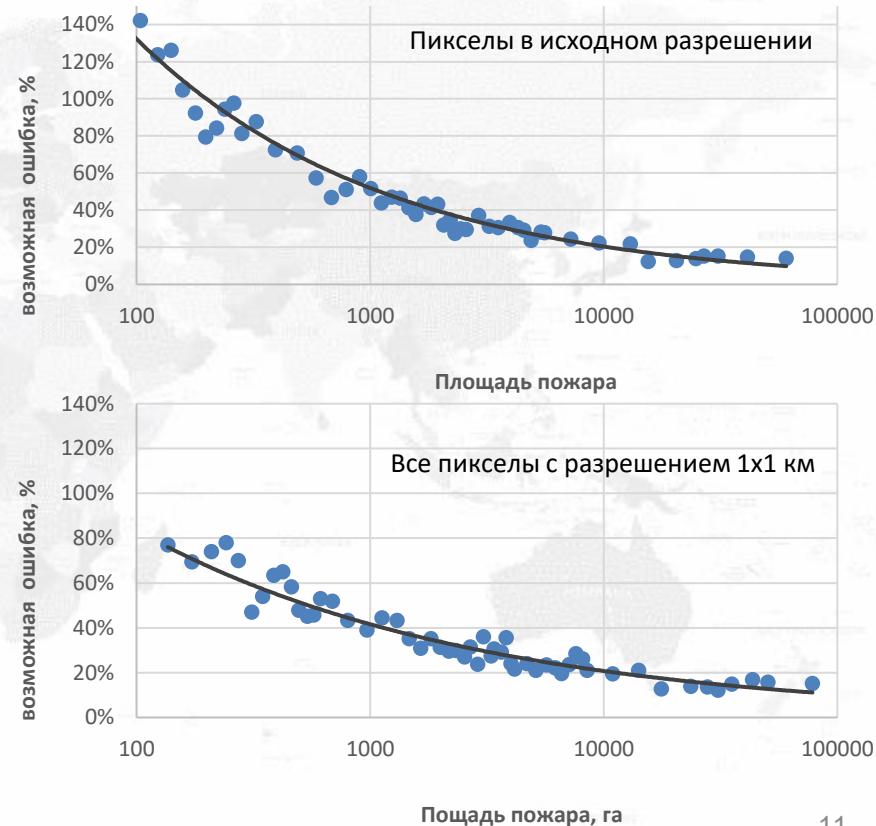
Формирование
зависимость
коэффициента
коррекции от
геометрической
площади пожара



На основе сравнения геометрических площадей пожаров, сформированных на основе детектирования горения, и площадей гарей, полученных с использованием данных высокого разрешения (10-30 м), в зависимости от площади пожара формируется коэффициент коррекции $K_{\text{инт}}$, который в дальнейшем используется при оценке площади, пройденной пожаром.

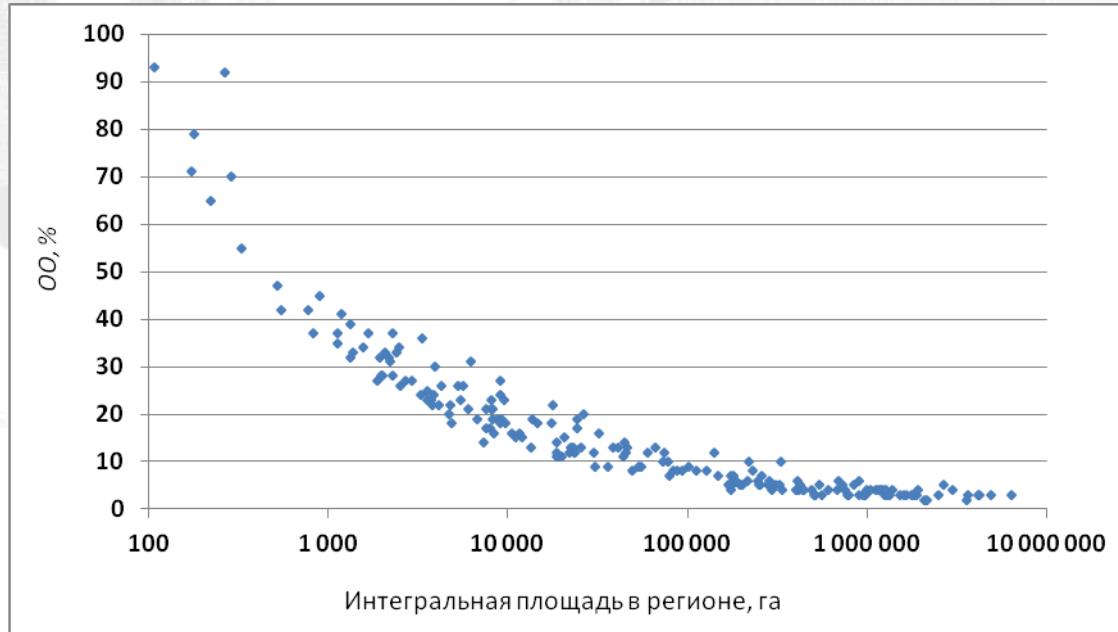
Что позволяет данная технология оценки площади пожаров

- уточнить оценку площади, пройденной пожарами
- обеспечить возможность согласования оценок площадей, пройденных огнем, для различных подходов проведения оценки
- обеспечить возможность получения сопоставимых оценок на основе данных различных спутниковых систем



Некоторые оценки точности получаемых площадей, пройденных огнем

Зависимость относительных ошибок оценки интегральной площади, пройденной лесными пожарами, от площади, пройденной огнем

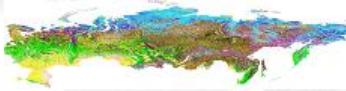


Ошибка в оценке на основе МС6 площади, пройденных лесными пожарами, на всей территории РФ составляет около 6-8%

Технология оценки повреждений лесов пожарами на основе данных об интенсивности горения

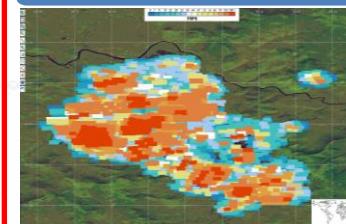
Оценка повреждений лесов пожарами на основе анализа интенсивности горения

Данные типа растительности



- Тип растительности, на котором происходил пожар

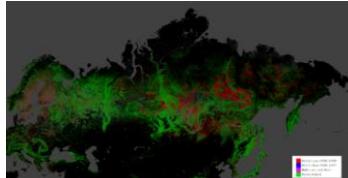
Карты MaxFRPS



- MaxFRPS
- Месяц наблюдаемого пожара

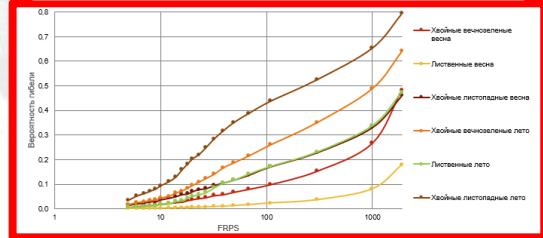
Spix – площадь ячейки карты MaxFRPS

Маска леса по данным высокого разрешения



Kforest=0.859 – коэффициент коррекции содержания растительности в пикселе среднего разрешения

- Выбор кривой вероятности по типу растительности и месяцу пожара
- Получение Pdam – значение выбранной кривой вероятности в точке с соответствующим FRPS



$$S_{\text{dam}} = Spix \cdot P_{\text{dam}} \cdot K_{\text{forest}}$$

Оценка площади погибшей растительности внутри ячейки карты FRPS

Имеющаяся информация о действующих пожарах

БД «горячих точек» и «пожаров» (объединений горячих точек), сформированная на основе данных Collection 6 MODIS Active Fire / Hotspot Data.

- БД содержит данные о горячих точках, включая: дату и время действия, размер, температуру, FRP, тип территории (включая тип растительного покрова), информацию о регионе и уровне охраны;
- БД содержит информацию за период с 2001 года по настоящее время;
- БД очищена от «постоянных огней» (антропогенных объектов и перегретых открытых поверхностей);
- в БД **имеется информация о 8 млн «горячих» точек**
- в БД содержится информация по всей территории России;
- Для определения типа территории, на которой зафиксирована «горячая точка», используется постоянно обновляющийся ряд карт, созданный на основе данных MODIS (*Барталев С.А., Егоров В.А., Жарко В.О., Лупян Е.А., Плотников Д.Е., Хвостиков С.А., Шабанов Н.В. Спутниковое картографирование растительного покрова России // М.: ИКИ РАН, 2016. 208 с.*)

Имеющаяся информация о постпожарных повреждениях

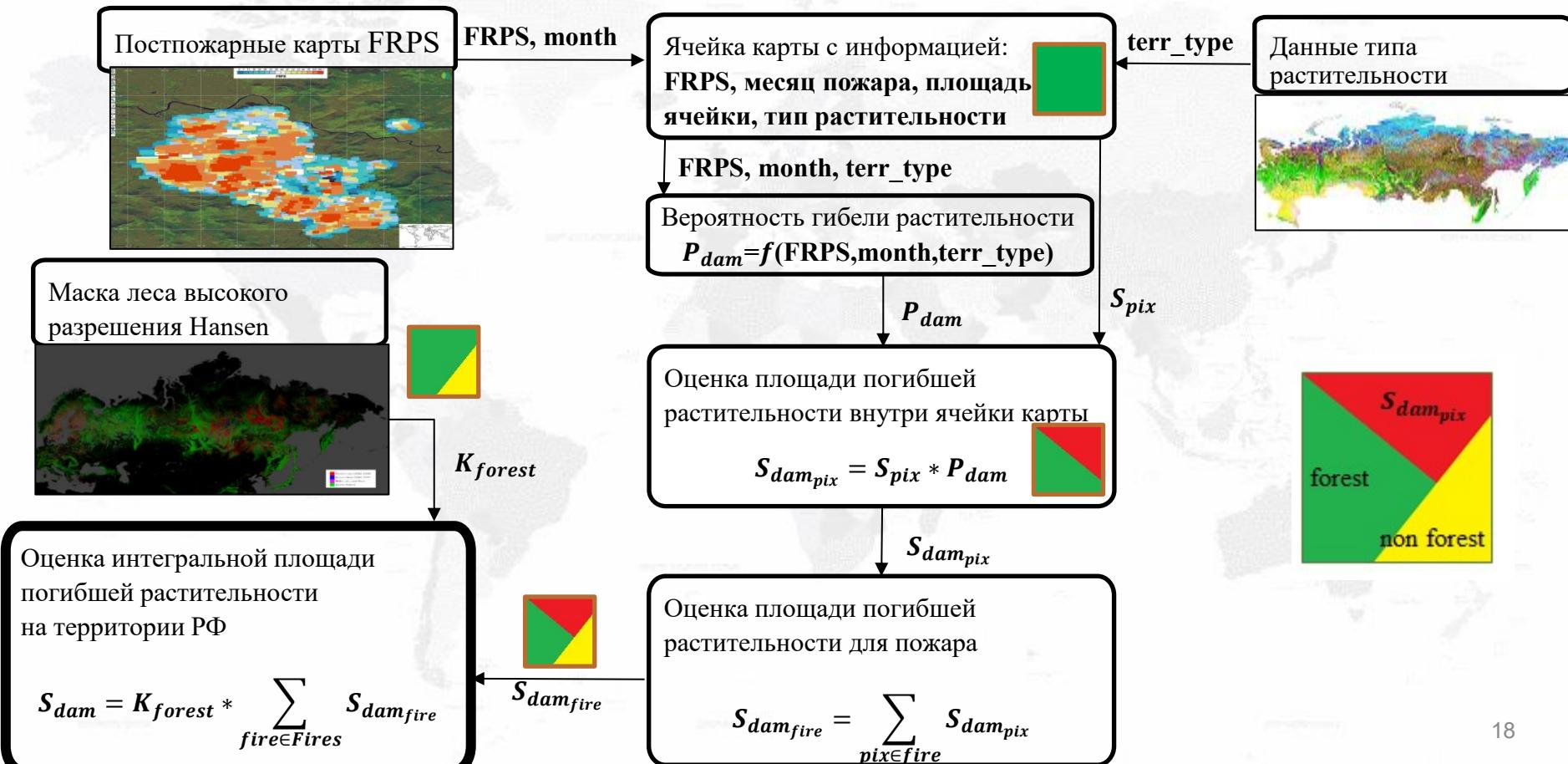
- БД информации о постпожарных повреждениях лесного покрова, полученных по данным MODIS (пространственное разрешение 230м) на основе технологии, разработанной в ИКИ РАН ([Стыценко Ф. В., Барталев С. А., Егоров В. А., Лупян Е. А. Метод оценки степени повреждения лесов пожарами на основе спутниковых данных MODIS, 2013](#))
- БД содержит информацию о точках на территориях, покрытых лесом, в которых были обнаружены постпожарные повреждения на основе сравнения спутниковых наблюдений до и после времени действия пожара;
- для каждой точки имеется информация: о пожаре, в результате которого она возникла, и средневзвешенная категория состояния (СКС), а также о типе лесного покрова ;
- БД содержит информацию за период с 2006 года по 2024 год;
- в БД **имеется информация о 15 млн точек**, в которых были обнаружены изменения лесного покрова
- в БД содержится информация по всей территории России;

Вероятность гибели леса для различных FRPS (пожаров в разных типах растительности в разные сезоны)



Зависимости вероятности гибели лесов от интенсивности пожаров существенно зависят от типов лесов, по которым распространяются пожары

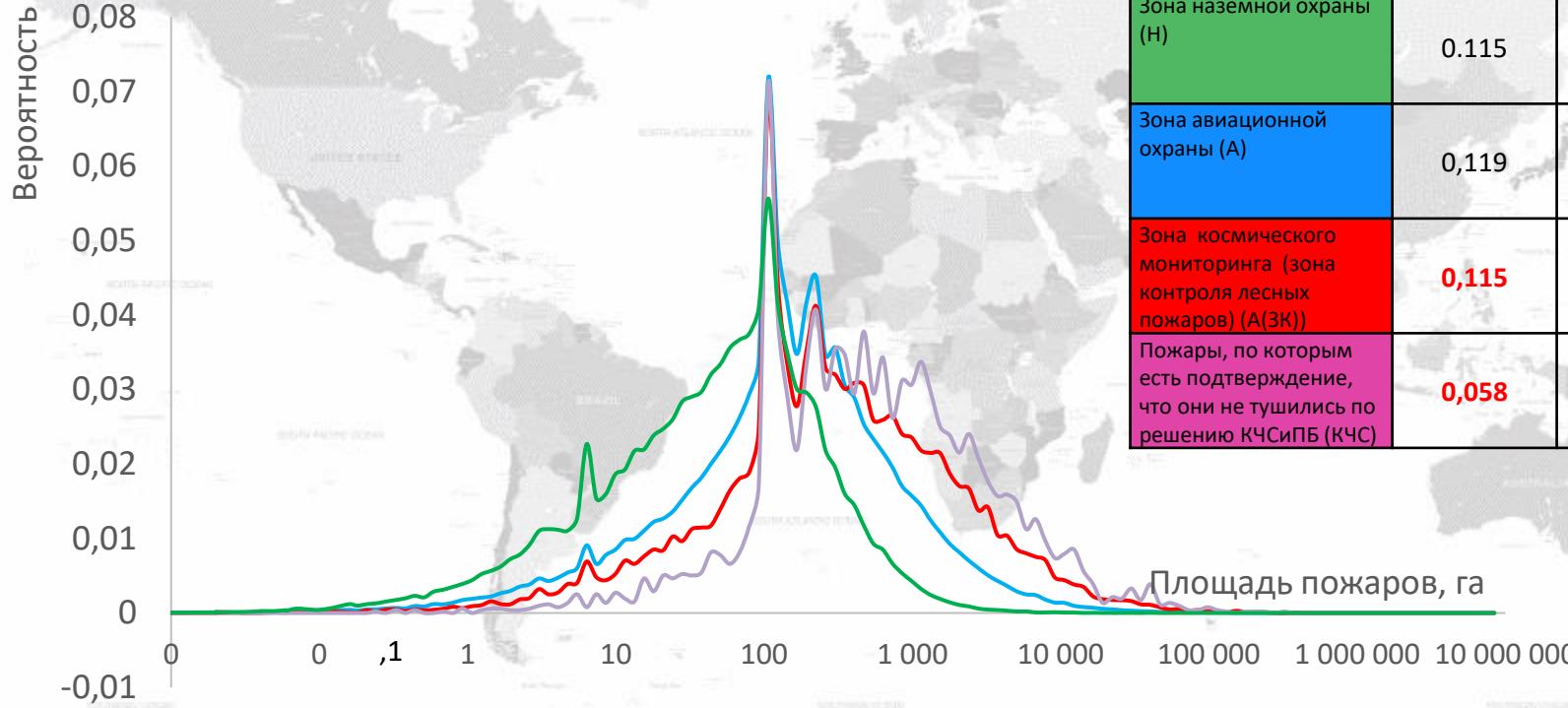
Схема оперативной оценки гибели лесов от пожаров на основе анализа интенсивности горения



Различные методы анализа данных для принятия управленческих решений

Методика оценки эффективности организации тушения пожаров на основе анализа распределений пожаров по пройденным площадям

Плотности распределения площадей, пройденных лесными пожарами, в лесопожарных зонах с разным уровнем охраны



Учитываемая территория	Статистика Колмогорова-Смирнова (d) для моделей, построенных по распределениям:		
	логнормальное	обобщенных экстремальных значений	Обобщённоe Парето
Зона наземной охраны (Н)	0,115	0,100	x
Зона авиационной охраны (А)	0,119	0,095	0,205
Зона космического мониторинга (зона контроля лесных пожаров) (А3К)	0,115	0,221	0,173
Пожары, по которым есть подтверждение, что они не тушились по решению КЧСиПБ (КЧС)	0,058	0,064	0,200

Как используются созданные технологии

(Примеры созданных на их основе информационных систем)

Информационная система дистанционного мониторинга лесных пожаров (ИСДМ-Рослесхоз)

<https://nffc.aviales.ru>

Максимальная автоматизация обработки и анализа данных обеспечивает получение объективной информации о лесных пожарах и их последствиях



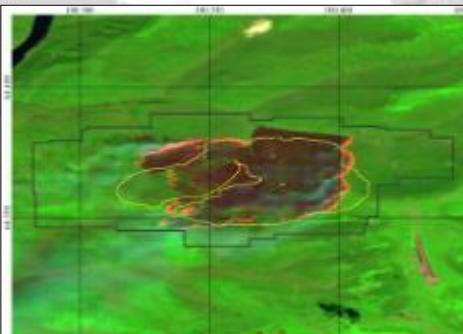
Оперативное детектирование и картирование пожаров. Якутия 15.06.2020

Лесные пожары в России		Лесные пожары в мире					
Показатель	Значение	Показатель	Значение	Показатель	Значение	Показатель	Значение
Количество пожаров	1000						
Площадь горения, га	1000000						
Количество погибших	0						
Количество пострадавших	0						
Количество эвакуированных	0						
Количество погибших животных	0						
Количество пострадавших животных	0						
Количество эвакуированных животных	0						

Автоматическое формирование различных аналитических форм



Картографирование гарей



Оперативное моделирование распространения пожаров

Введена в эксплуатацию в 2005 году
(20 лет в эксплуатации)

Зона действия: вся территория РФ

Разработчики: ИКИ РАН, ФБУ «Авиалесоохрана», ЦЭПЛ РАН, ИСЗФ СО РАН, ИЛ СО РАН, НИЦ «Планета», ООО «Инком», ООО «ИКИЗ» и др. по заказу Рослесхоза РФ

Эксплуатирующая организация: ФБУ «Авиалесоохрана»

В том числе обеспечивает:

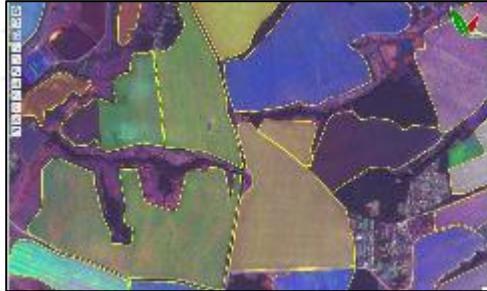
- круглосуточный дистанционный мониторинг пожаров на всей территории России
- получение информации в любой точке России более 20 раз в сутки. По регионам Дальнего Востока более 140 раз в сутки
- оперативный автоматизированный контроль лесопожарной обстановки на всей территории России
- оценку последствий действия лесных пожаров на основе данных различного разрешения
- контроль работ, выполняемых в регионах, по мониторингу и тушению лесных пожаров

С системой работают более 10 000 пользователей

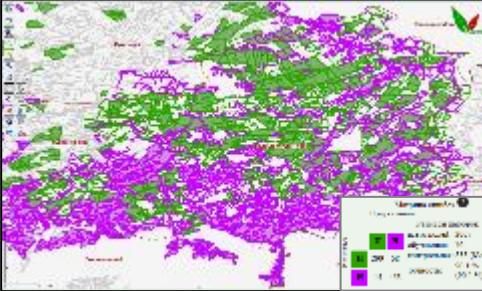
Информационная система Вега-PRO

<http://pro-vega.ru>

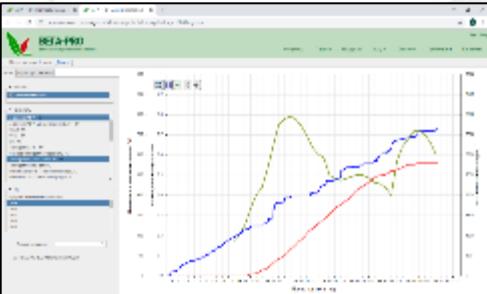
Профессиональный информационный сервис анализа данных спутниковых наблюдений для оценки и мониторинга возобновляемых биологических ресурсов



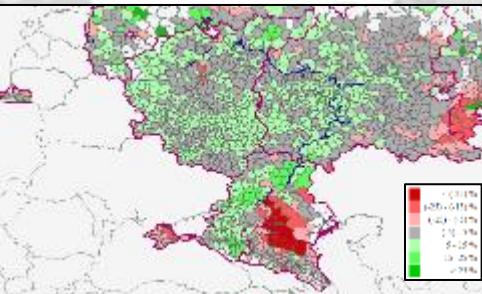
Анализ состояния полей с использованием разновременных наблюдений



Анализ используемости сельскохозяйственных угодий



Анализ динамики развития посевов



Анализ состояния культур на основе сравнения со среднемноголетними нормами динамики их развития

Введена в эксплуатацию в 2011 году

Зона действия: вся территория РФ, пограничные страны, западная Европа

Разработчики: ИКИ РАН, ООО «ИКИЗ» при поддержке фонда «Сколково».

Эксплуатирующая организация: ООО «ИКИЗ» при поддержке ИКИ РАН

Сервис ориентирован в основном на специалистов, работающих в области сельского хозяйства.

Его задача - обеспечение возможности контроля текущего состояния растительности на интересующем специалиста объекте (с/х полях, участках пастбищ, сенокосов и т.п.).

Пользователи сервиса самостоятельно могут задать границы интересующего объекта и производить анализ имеющихся для него данных.

Обеспечивает возможности работы как с оперативной, так и с архивной информацией. Глубина архивов около 40 лет.

Обеспечивает работу с БД, содержащей информацию о нескольких миллионах объектов.

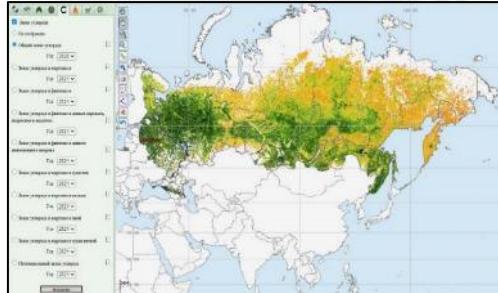
Информация в системе обновляется ежедневно.

С системой работают более 500 пользователей

Информационная аналитическая система «Углерод-Э»

<http://carbon.geosmis.ru>

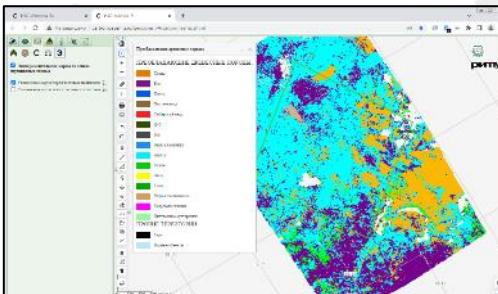
Организация работы с архивами спутниковых и наземных данных для ведения мониторинга пулов и потоков углерода в наземных экосистемах



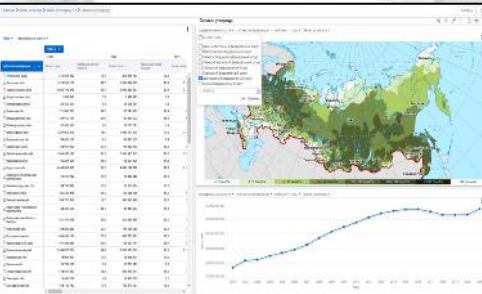
Работа с картами о запасах углерода, полученными на основе спутниковых данных



Работа с данными наземных обследований угодий



Инструменты локального анализа спутниковых данных



Анализ многолетних рядов информационных продуктов, полученных на основе обработки спутниковых данных

Создана в 2023 году

Зона действия: вся территория РФ

Разработчики: ИКИ РАН и ЦЭПЛ РАН. Создана в рамках ВИП ГЗ «Единая национальная система мониторинга климатически активных веществ»

Эксплуатирующая организация: ИКИ РАН

Обеспечивает решение широкого комплекса задач, включая:

получение ежегодно актуализируемой информации о качественных и количественных характеристиках лесов;

получение ежегодной информации о запасах и балансе углерода в лесах;

получение информации о повреждениях лесных и других наземных экосистем пожарами и другими деструктивными факторами;

предоставление инструментов комплексного анализа многолетних временных рядов данных о характеристиках лесных и других наземных экосистем;

предоставление инструментов комплексной обработки и анализа данных дистанционного зондирования и наземных наблюдений

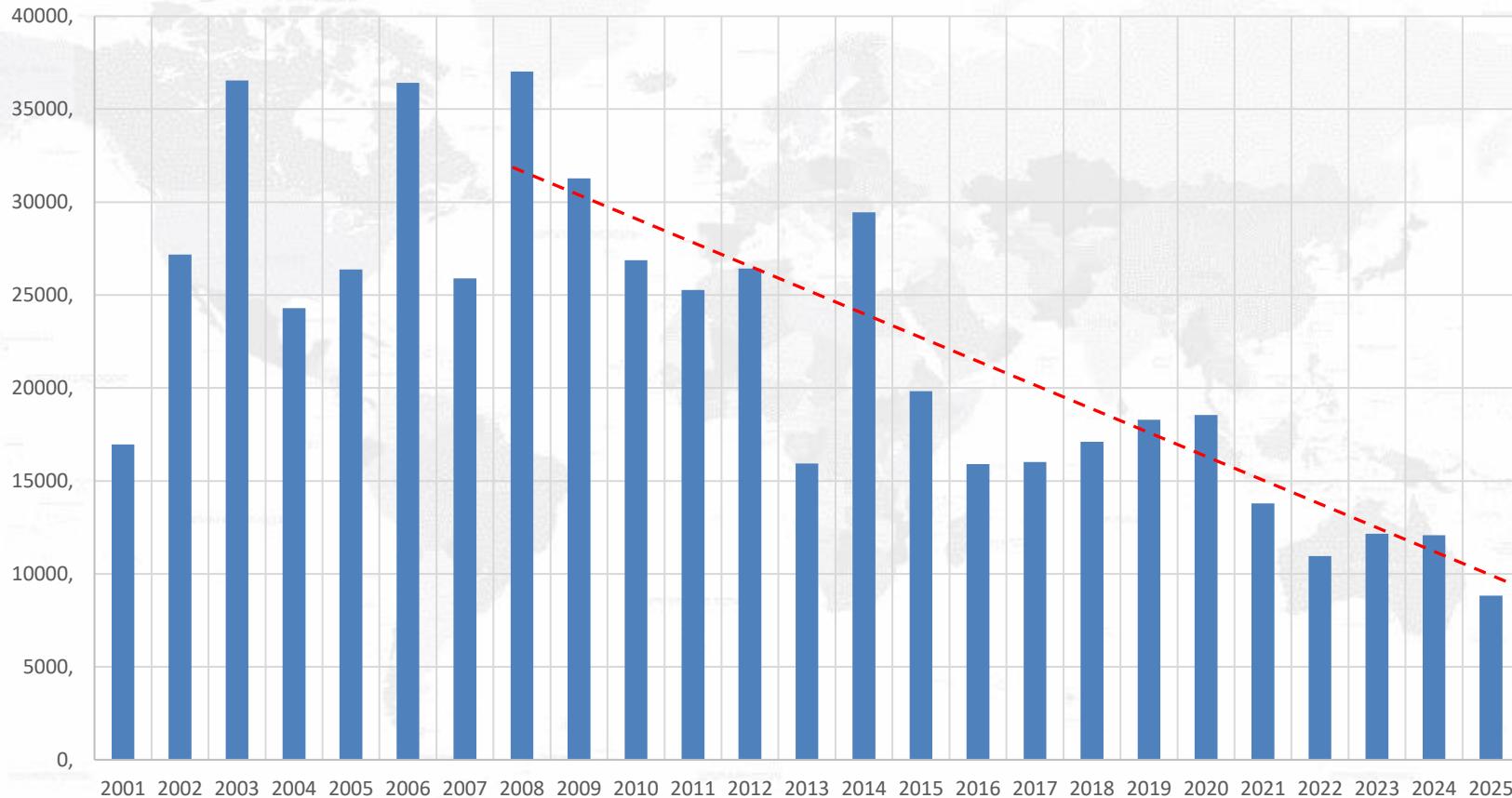
С системой работают более 20 организаций



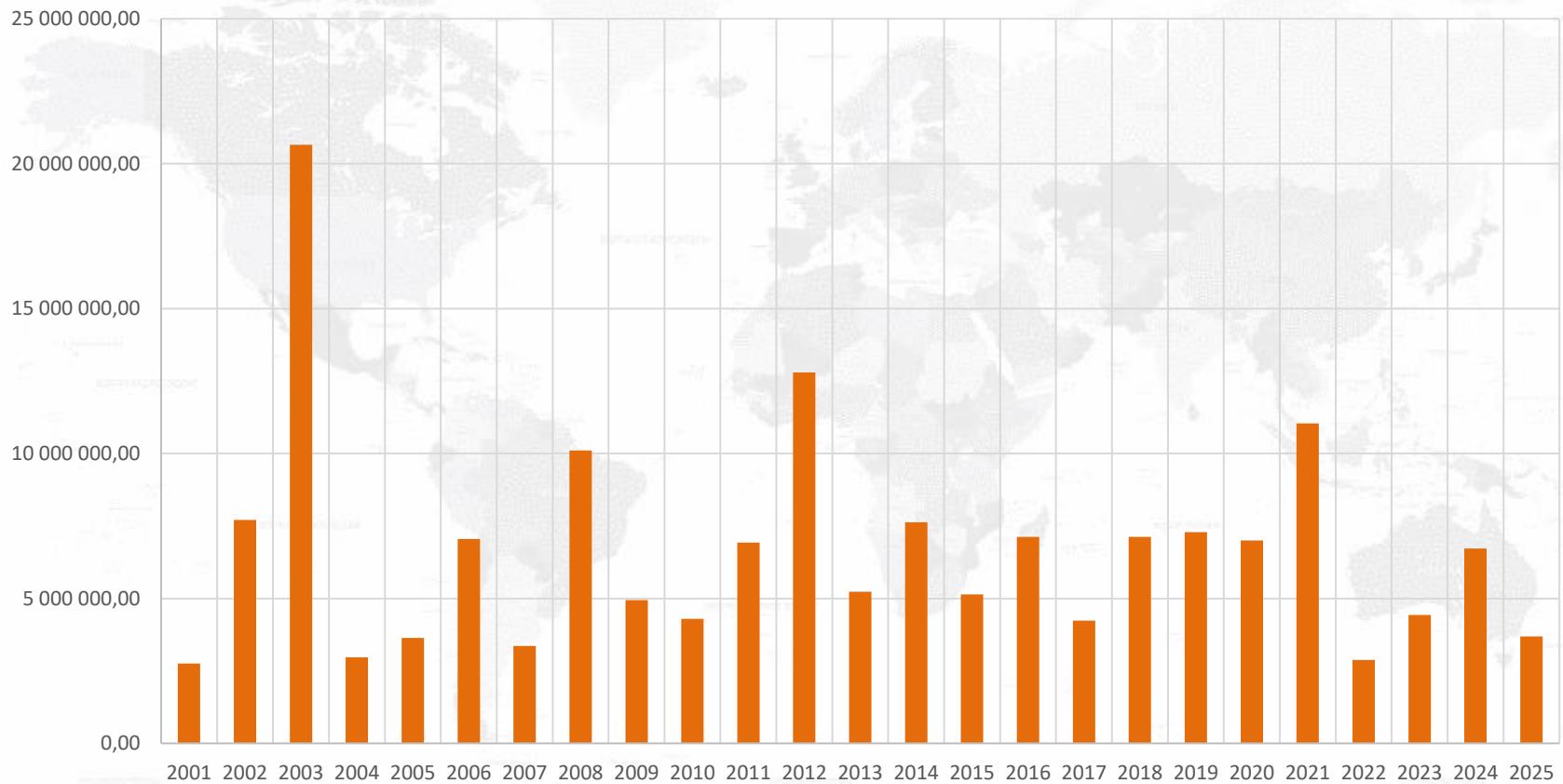
Некоторые примеры анализа долгосрочной динамики лесных пожаров на территории России в 21 веке (2001-2025 годы)

*Оценки получены на основе коллекции данных MODIS MC6, с использованием коррекции
площадей MC6v4 и коллекции карт растительного покрова РФ версии 5.6*

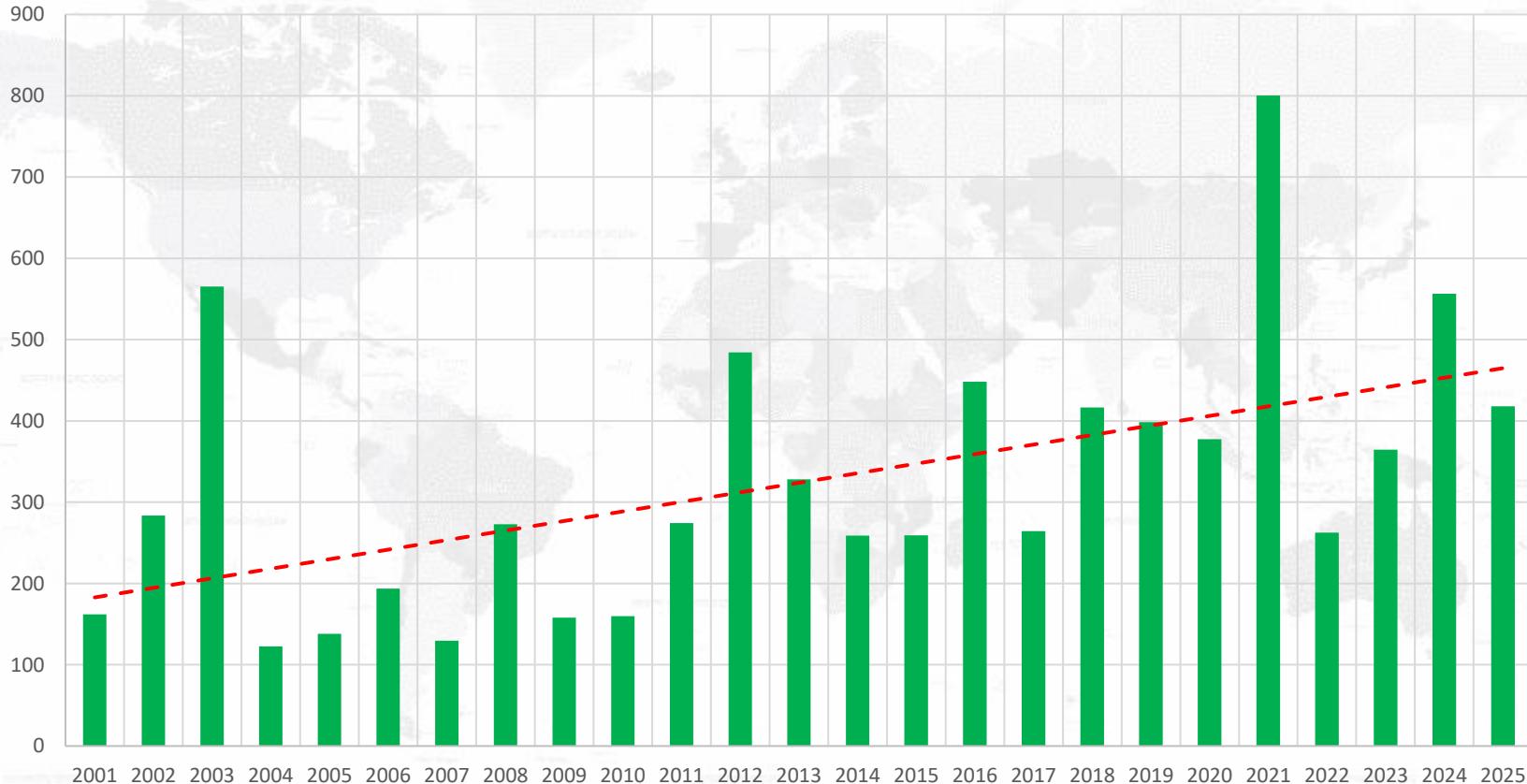
Динамика числа лесных пожаров



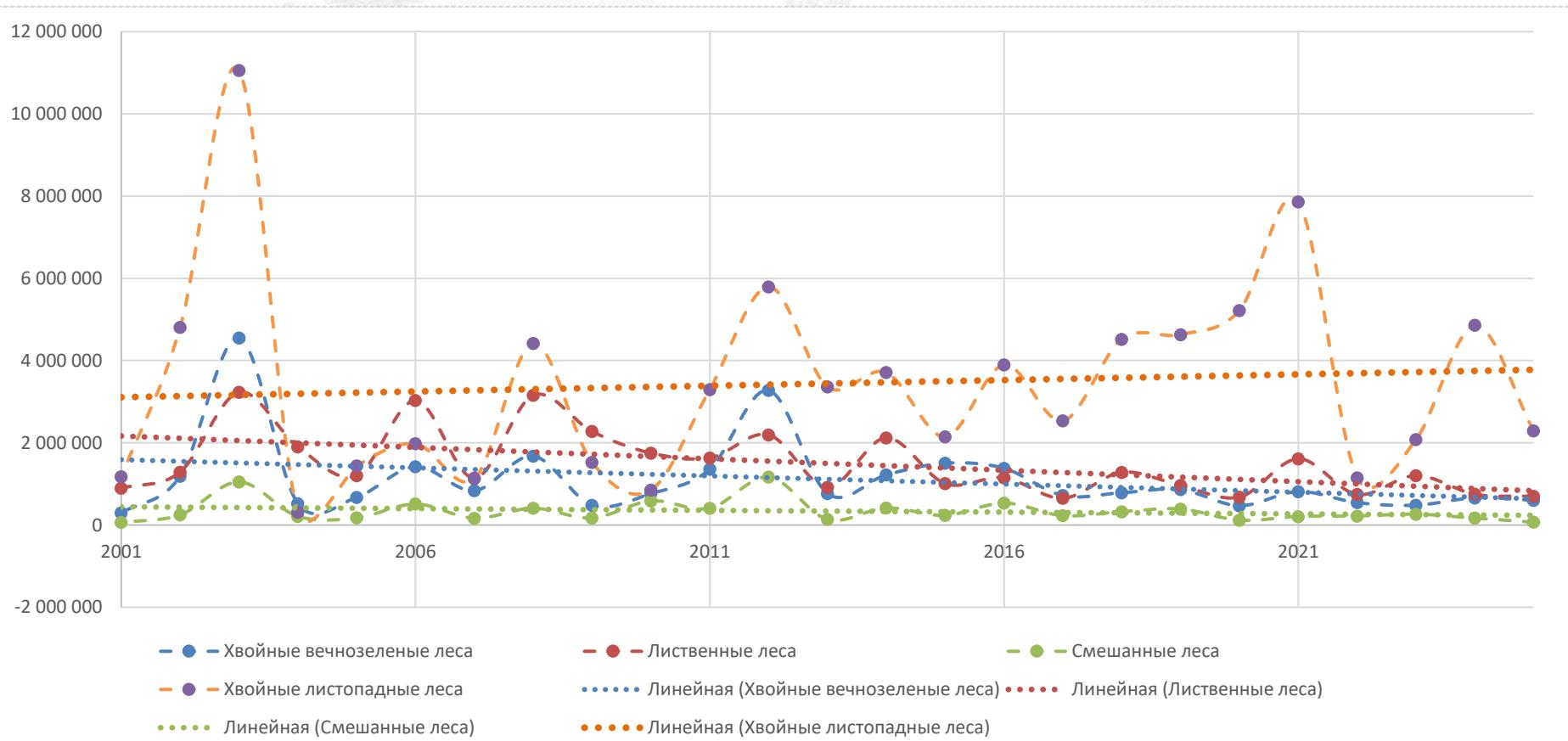
Динамика площади лесов, пройденных пожарами (га)



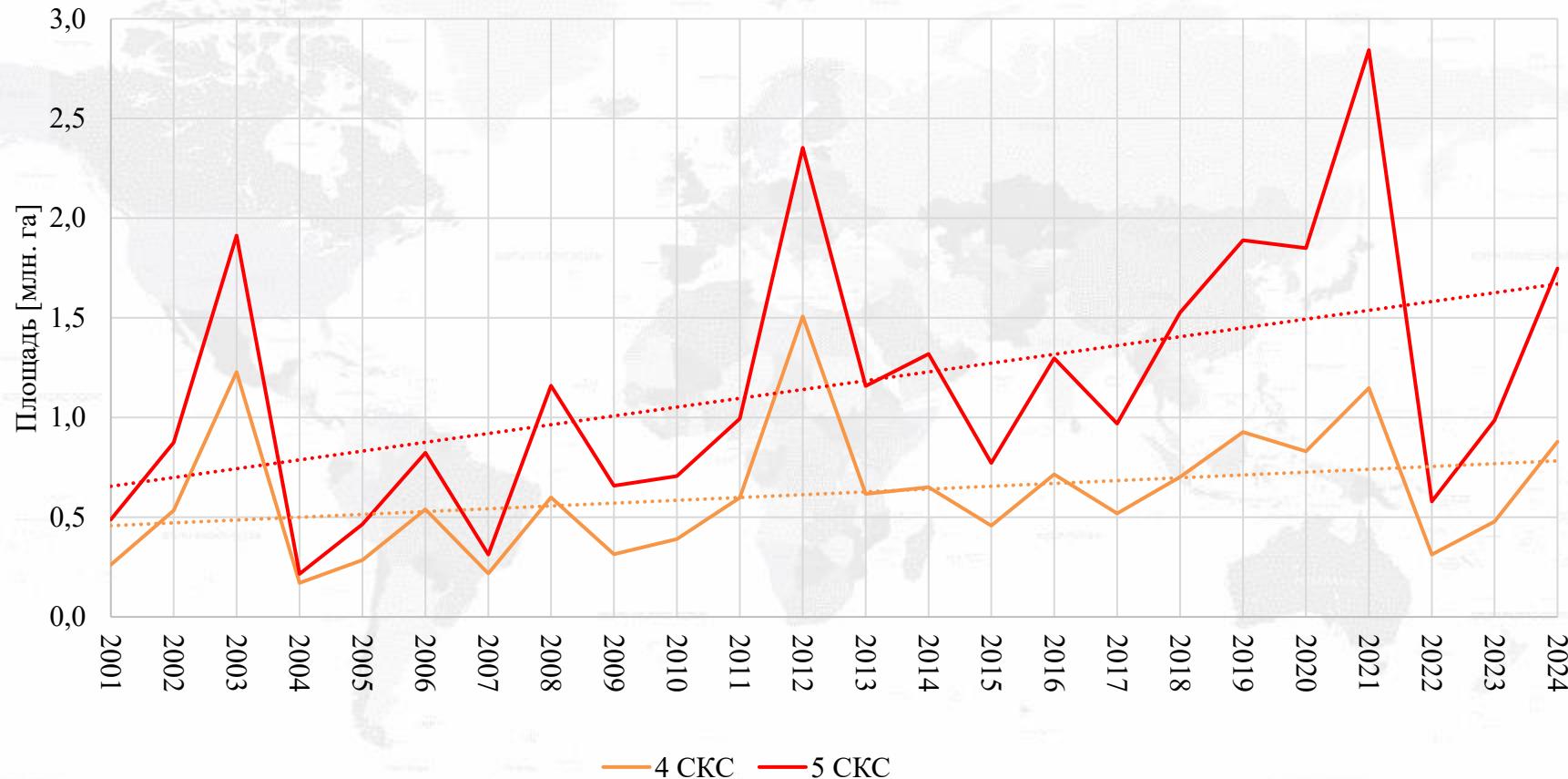
Динамика средней лесной площади, проходимой одним пожаром (га)



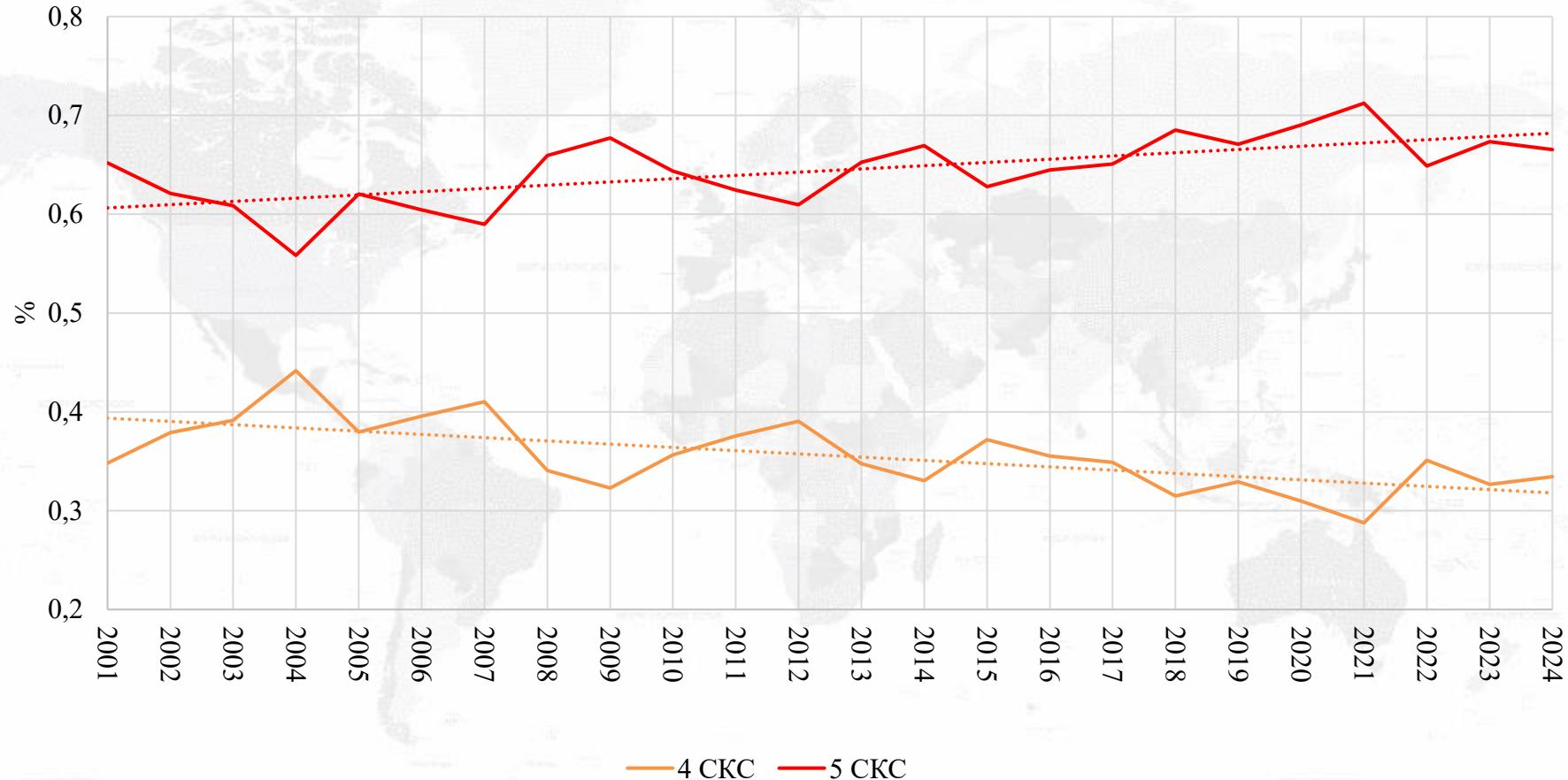
Динамика площадей пожаров в лесах различных типов (га)



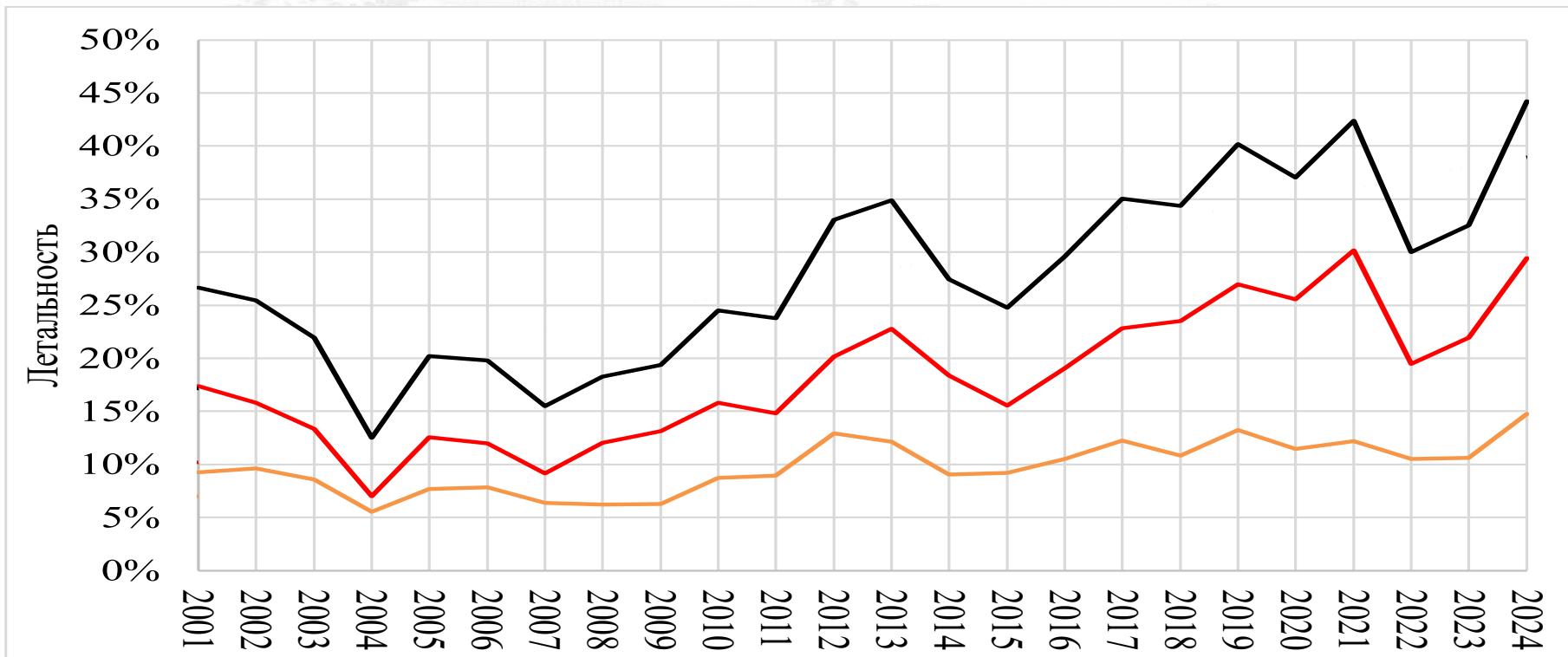
Площади сильно поврежденных (4 класс СКС) и погибших лесов (5 класс СКС)



Отношение площадей сильно поврежденных и погибших лесов



Динамика летальности пожаров (процент погибших и сильно поврежденных лесов)



Динамика летальности 4 СКС (оранжевая линия), 5 СКС (красная линия), 4 и 5 СКС вместе (черная линия)

Что будет после окончания работы MODIS ?

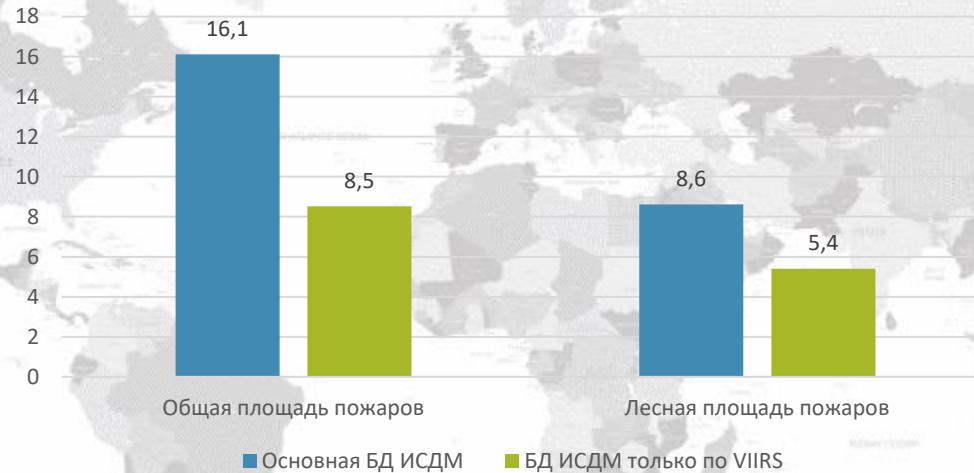
(Проблемы перехода на работу с данными других систем)

***Есть ли проблемы использования
созданных технологий для мониторинга
пожаров по данным MODIS для работы с
данными других систем?***

Оценка площадей, пройденных пожарами

Оценка изменений при переходе на наблюдения только прибором VIIRS

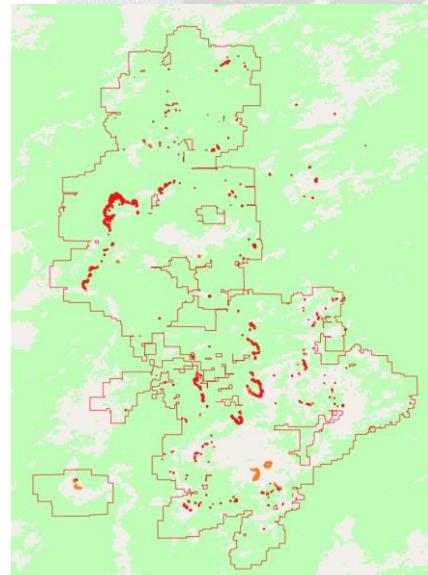
ОЦЕНКА ПЛОЩАДЕЙ ПОЖАРОВ ТОЛЬКО ПО
VIIRS, СЕЗОН 2024 Г, МЛН. ГА



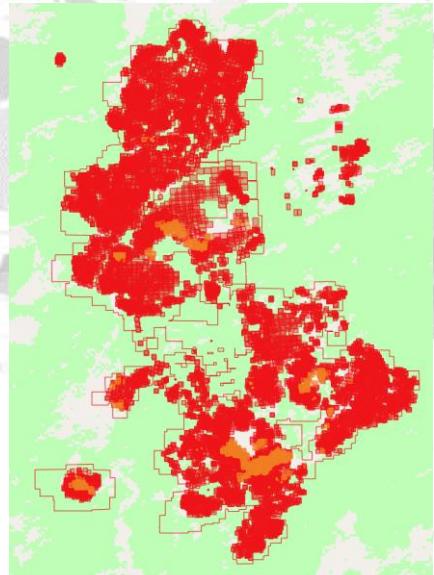
Исключение данных MODIS из учета пожаров приведет к пропуску практически 50% общей площади пройденной пожарами

Проблемы наблюдения пожаров по данным различного пространственного разрешения

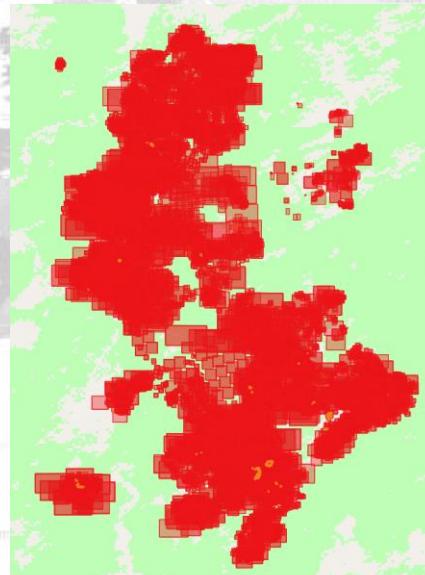
Пример наблюдений пожара за отдельные сутки спутниками разного пространственного разрешений



OLI (30 м)



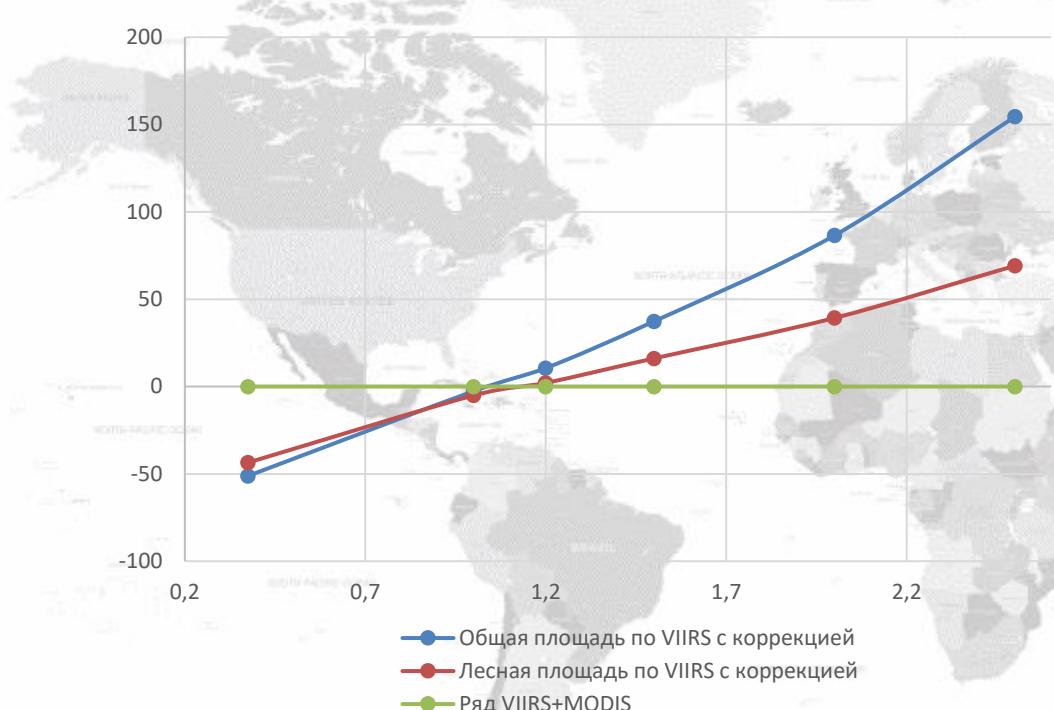
VIIRS (375 м)



Modis (1 км)

- Пропадает связность между отдельными наблюдениями
- Пожары «распадаются»
- Появляются пропуски площадей горения
- Уменьшится площадь наблюдаемого горения

Моделирование влияния размера пикселя на оценку площадей для временной схемы наблюдения, используемой в MODIS и VIIRS

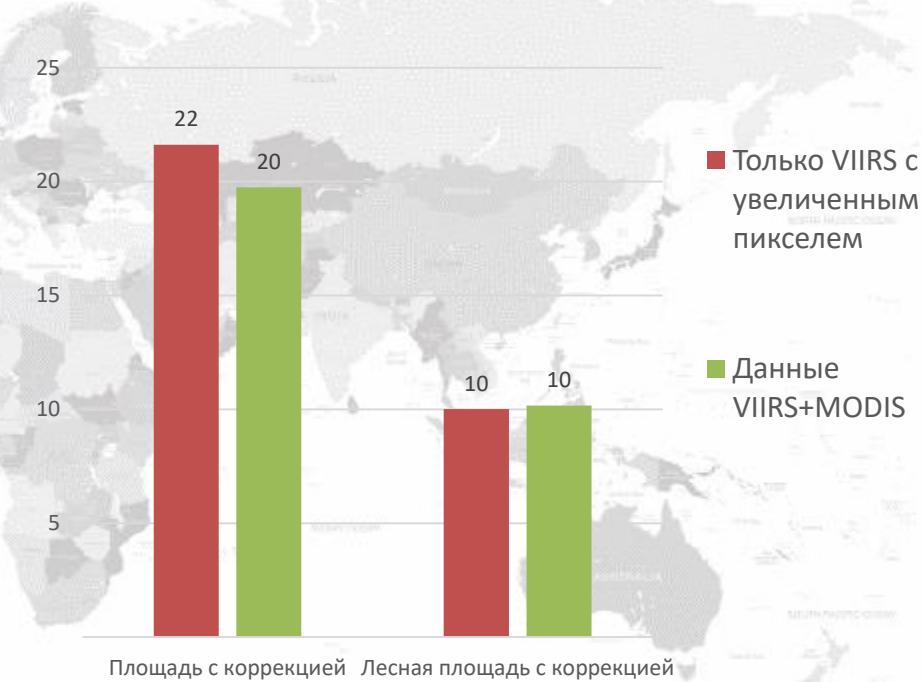
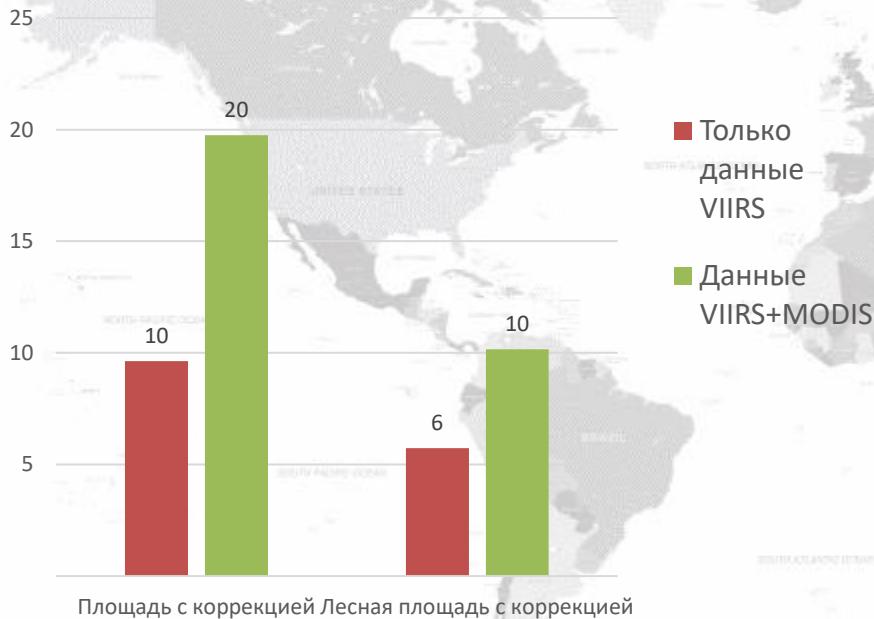


Разница в пройденной пожарами площади на территории РФ за 2021* год с модельными рядами, %

- Эксперименты по использованию разного размера пикселя горячих точек проведены на основе данных наблюдений пожаров на территории РФ
- Наилучший параметр размера пикселя для получения сопоставимой оценки лесных площадей может составлять 1-1.3 км
- Для адаптации технологии оценки площадей, пройденных огнем, для работы с данными VIIRS необходимо «искусственно» провести загрубление разрешения данных

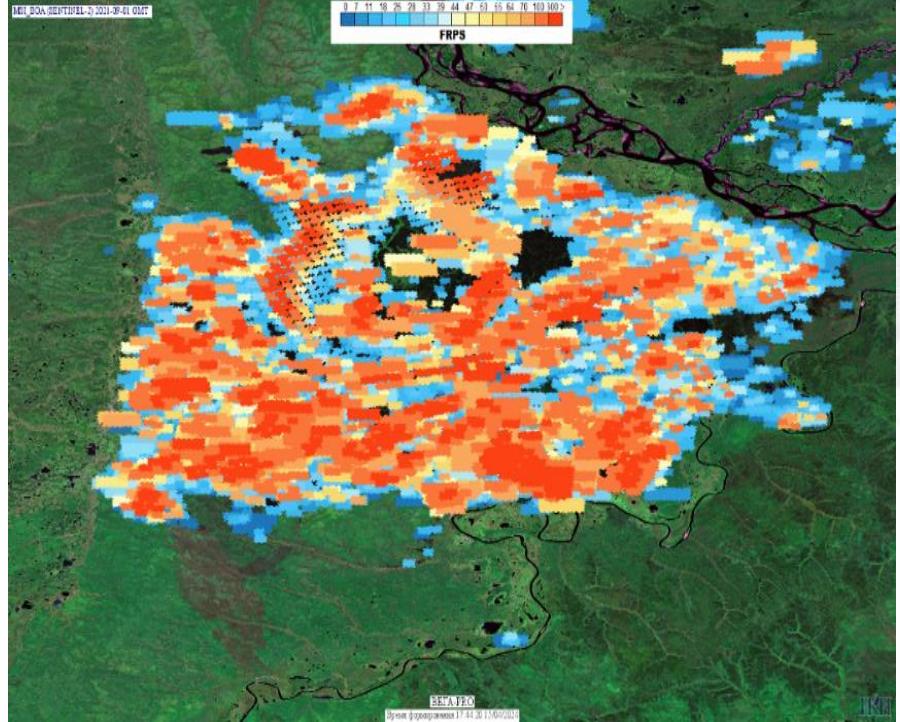
Возможность адаптации технологии оценки пройденных пожарами площадей для работы с данными VIIRS

Пройденные пожарами площади на территории РФ за 2020 год, млн. га

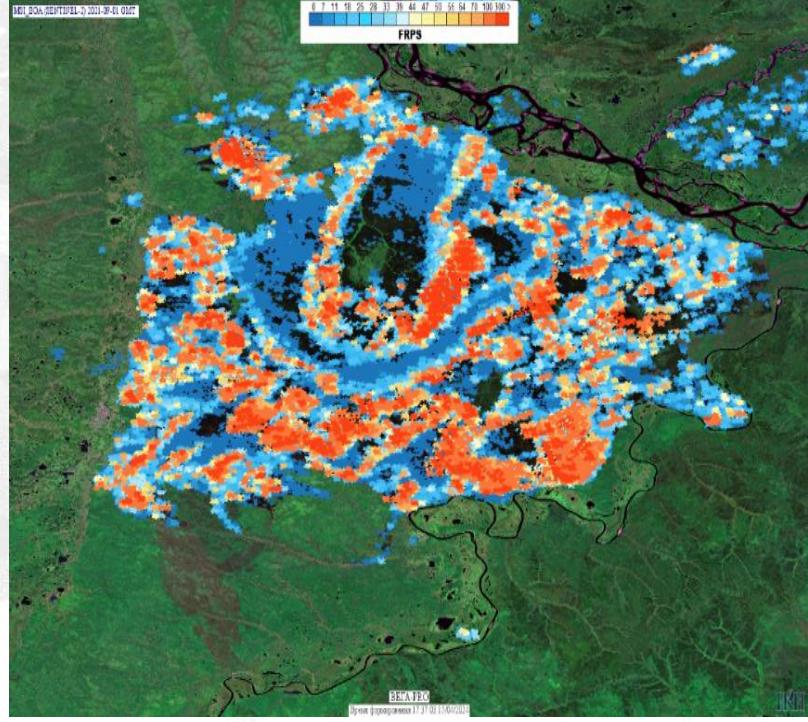


Оценка повреждений на основе анализа интенсивности горения

Различия в картах максимального FRPS



по данным MODIS

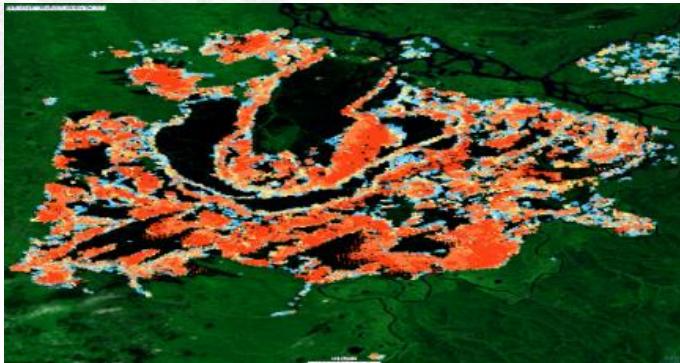


по данным VIIRS

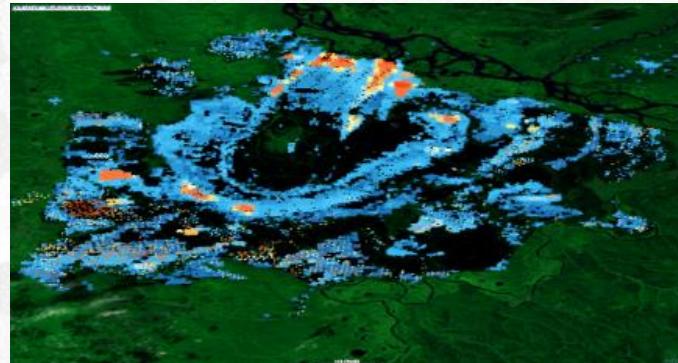
Одна из причин возникновения различий

VIIIRS

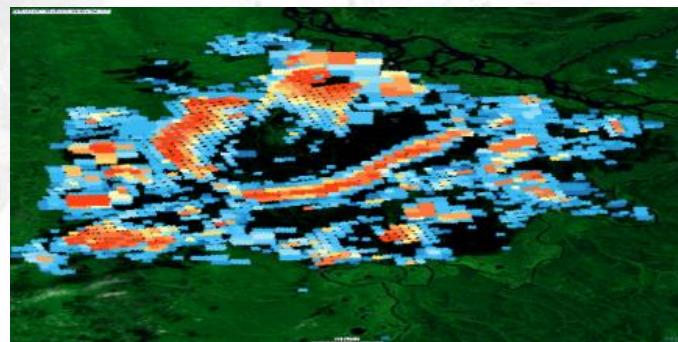
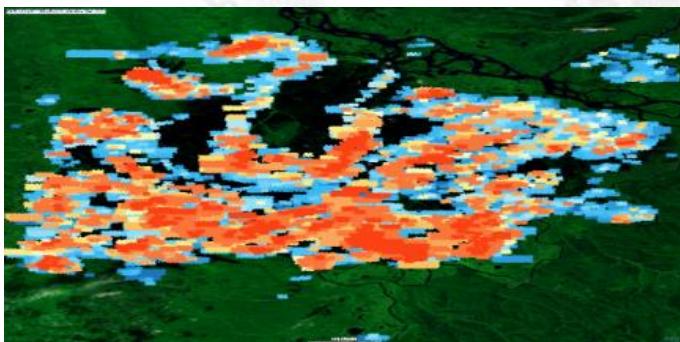
День



Ночь

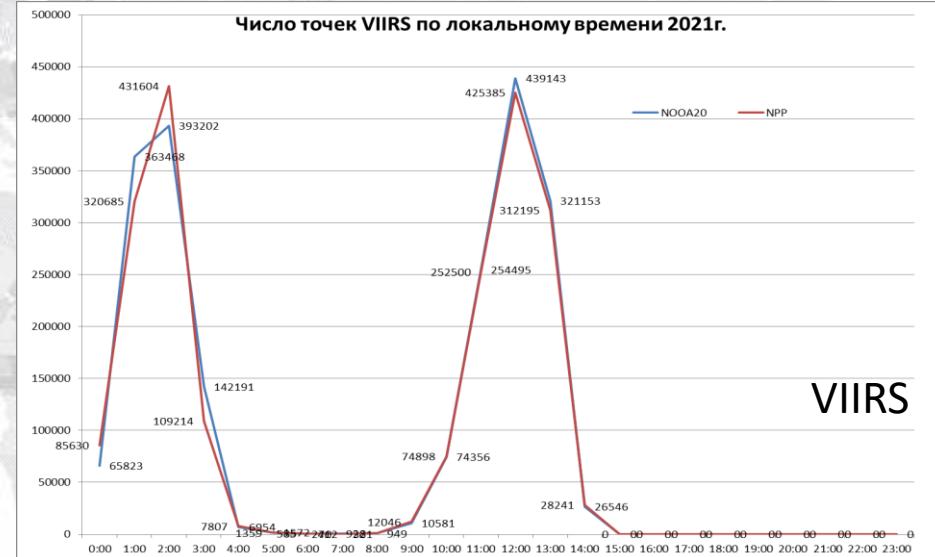
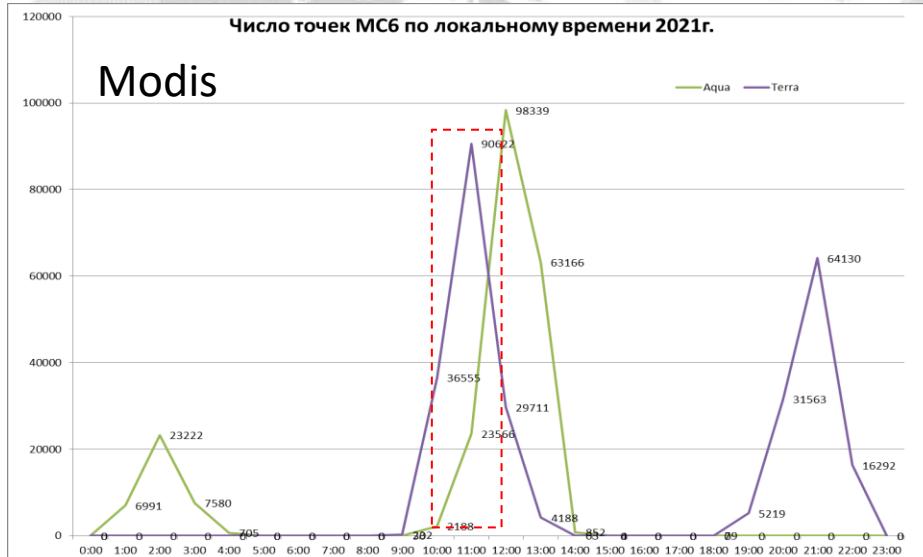


MODIS



Почему возникают такие расхождения

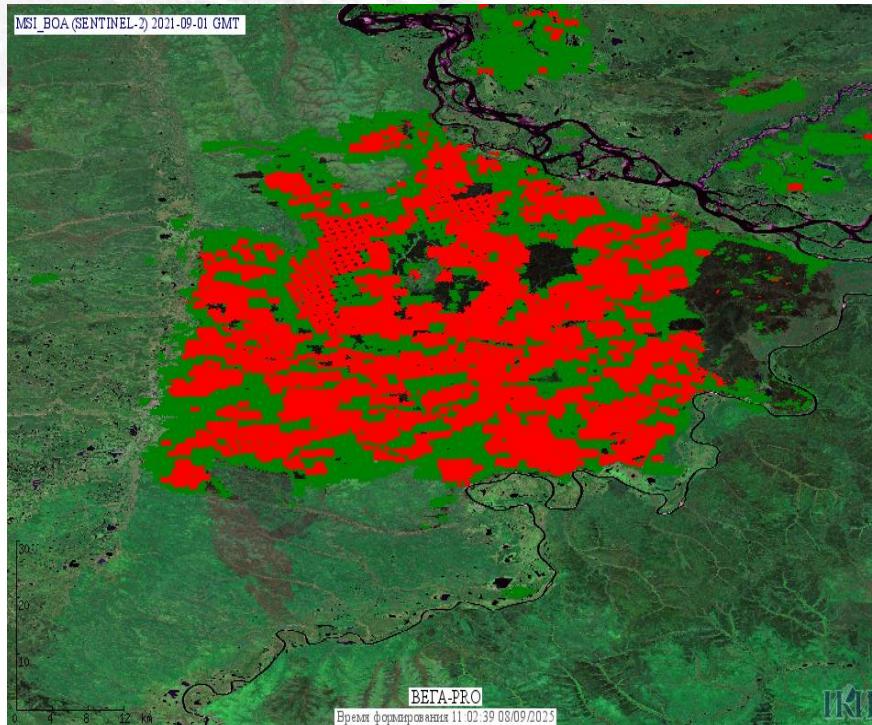
Различие временных схем наблюдения



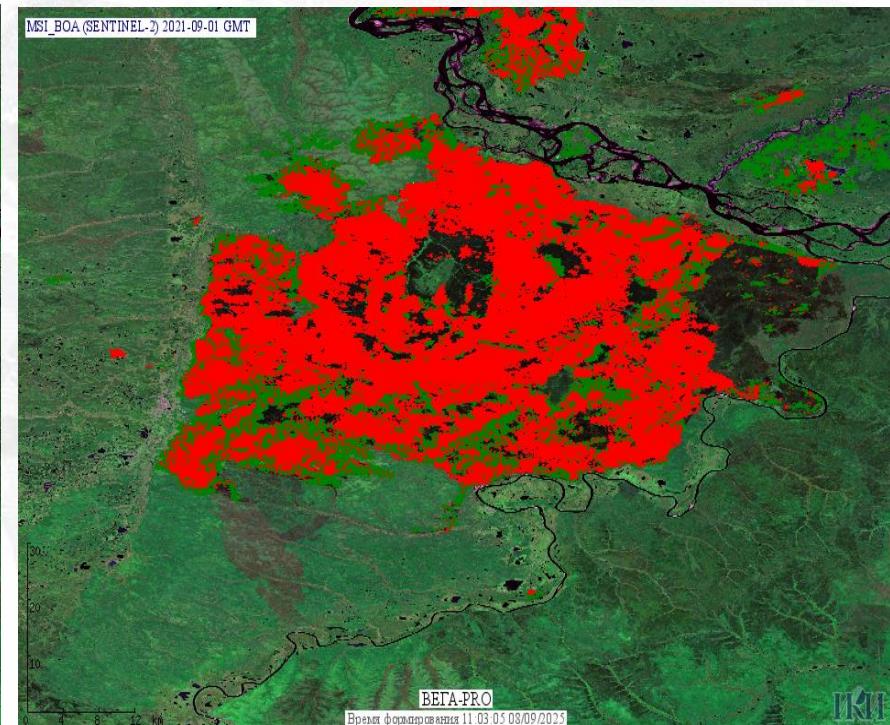
Необходимо учитывать зависимость вероятности повреждений от времени, в которое проводится наблюдения

Адаптация процедуры оценки вероятности повреждений с учетом особенностей VIIRS

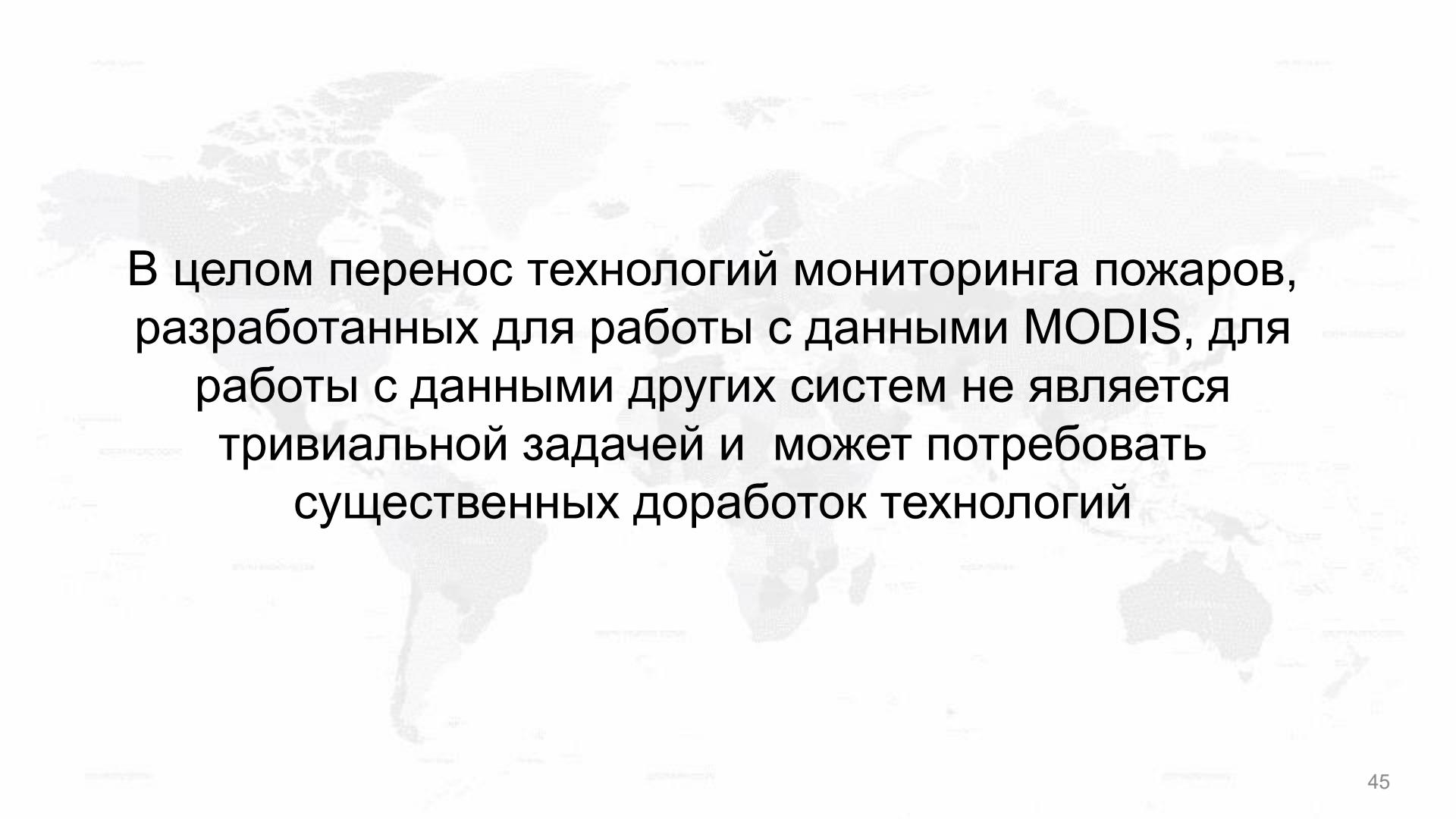
Карты вероятных повреждений лесов красный – 4-5 СКС, зеленый – 1-3 СКС



по данным MODIS



по данным VIIRS (предварительные оценки)₄₄



В целом перенос технологий мониторинга пожаров, разработанных для работы с данными MODIS, для работы с данными других систем не является тривиальной задачей и может потребовать существенных доработок технологий

Спасибо за внимание !

Контактная информация:

Лупян Евгений Аркадьевич
e-mail: evgeny@smis.iki.rssi.ru
тел. +7 916 124 71 49

Отдел «Технологий
спутникового
Мониторинга»

