

Оценка последствий воздействия природных пожаров на лесные экосистемы

Стыценко Ф.В.

ИКИ РАН, ЦЭПЛ РАН

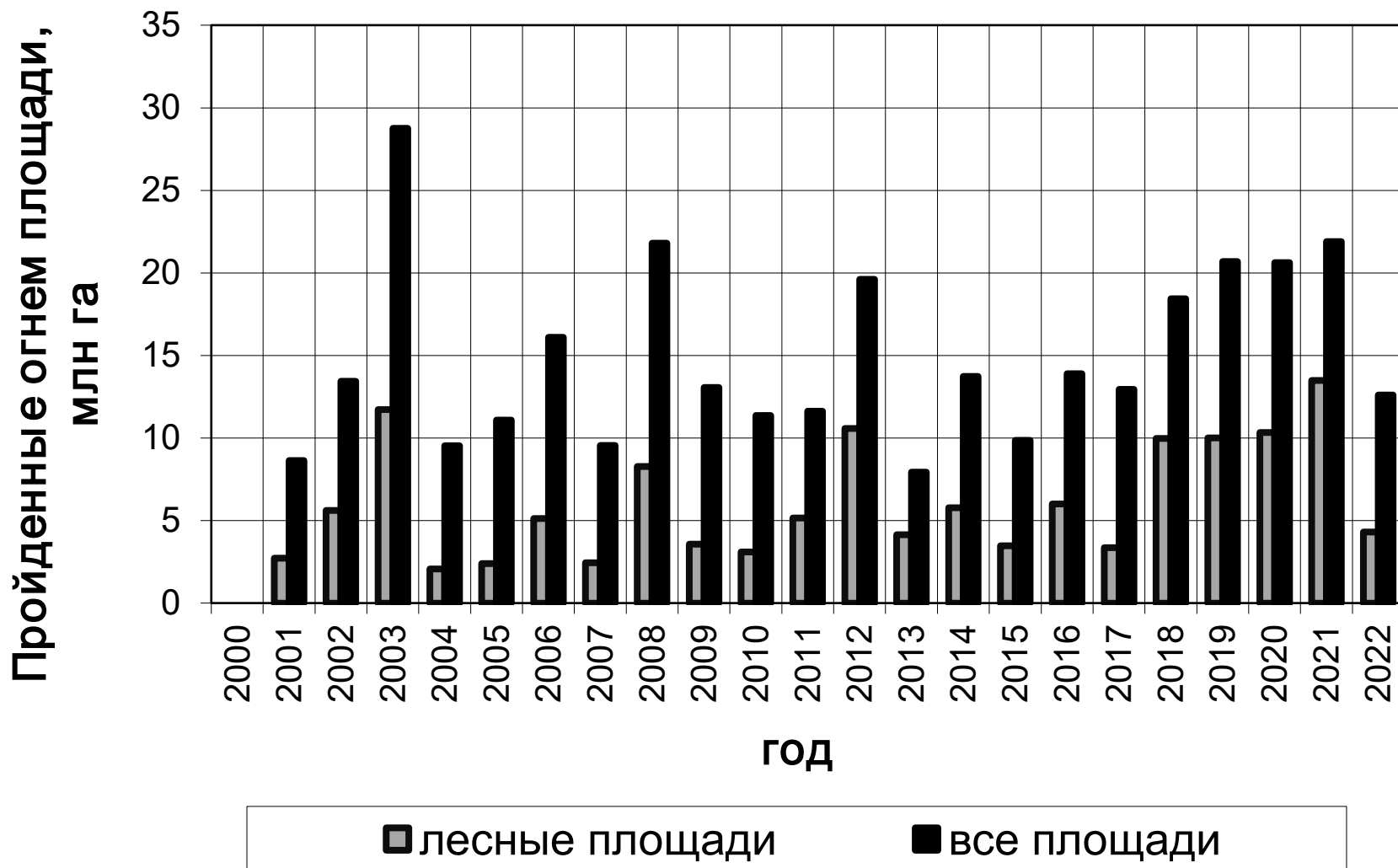
XVIII Международная научная Школа-конференция молодых ученых по фундаментальным проблемам дистанционного зондирования Земли из космоса

Двадцатая международная конференция «СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ ИЗ КОСМОСА (Физические основы, методы и технологии мониторинга окружающей среды, потенциально опасных явлений и объектов)»

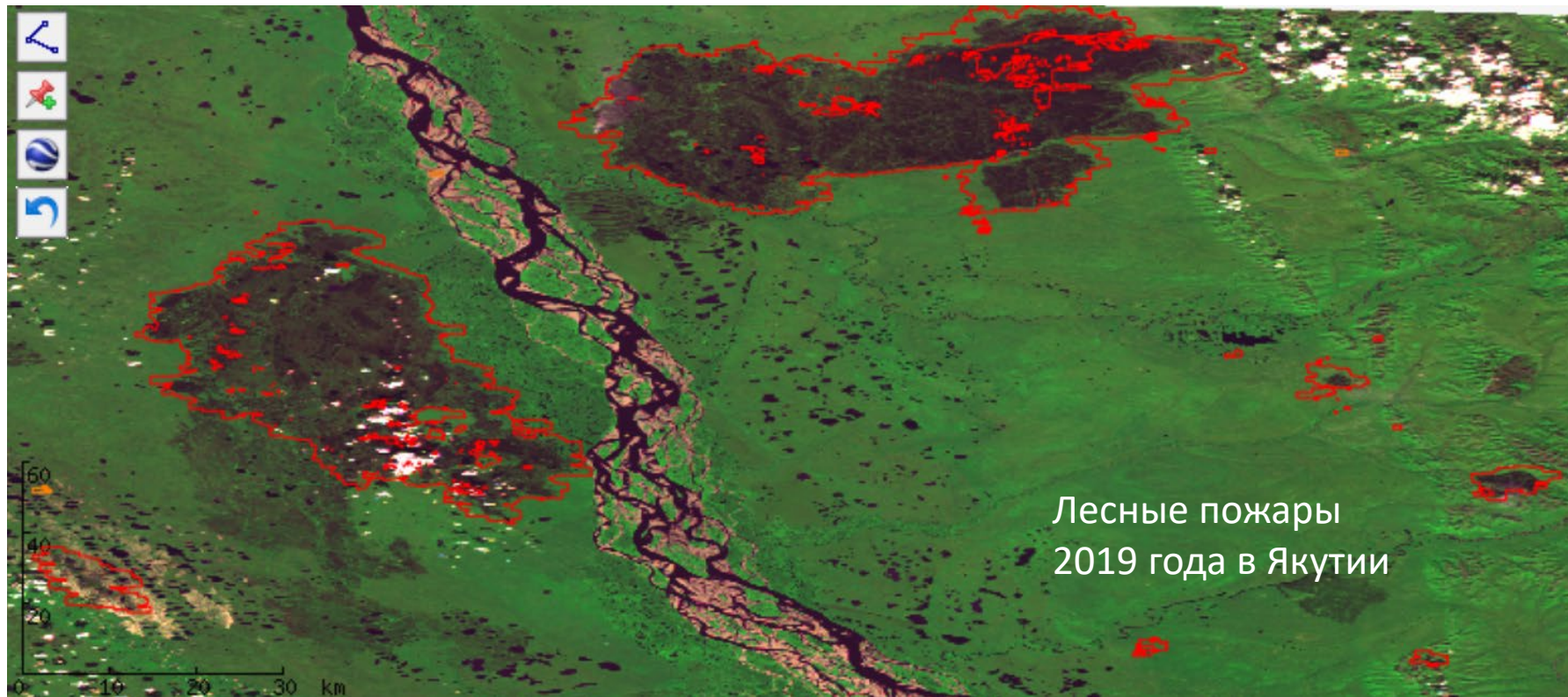
Москва, 2022



Площади пожаров на территории России в 2001-2022 г. на основе детектирования очагов горения по данным MODIS

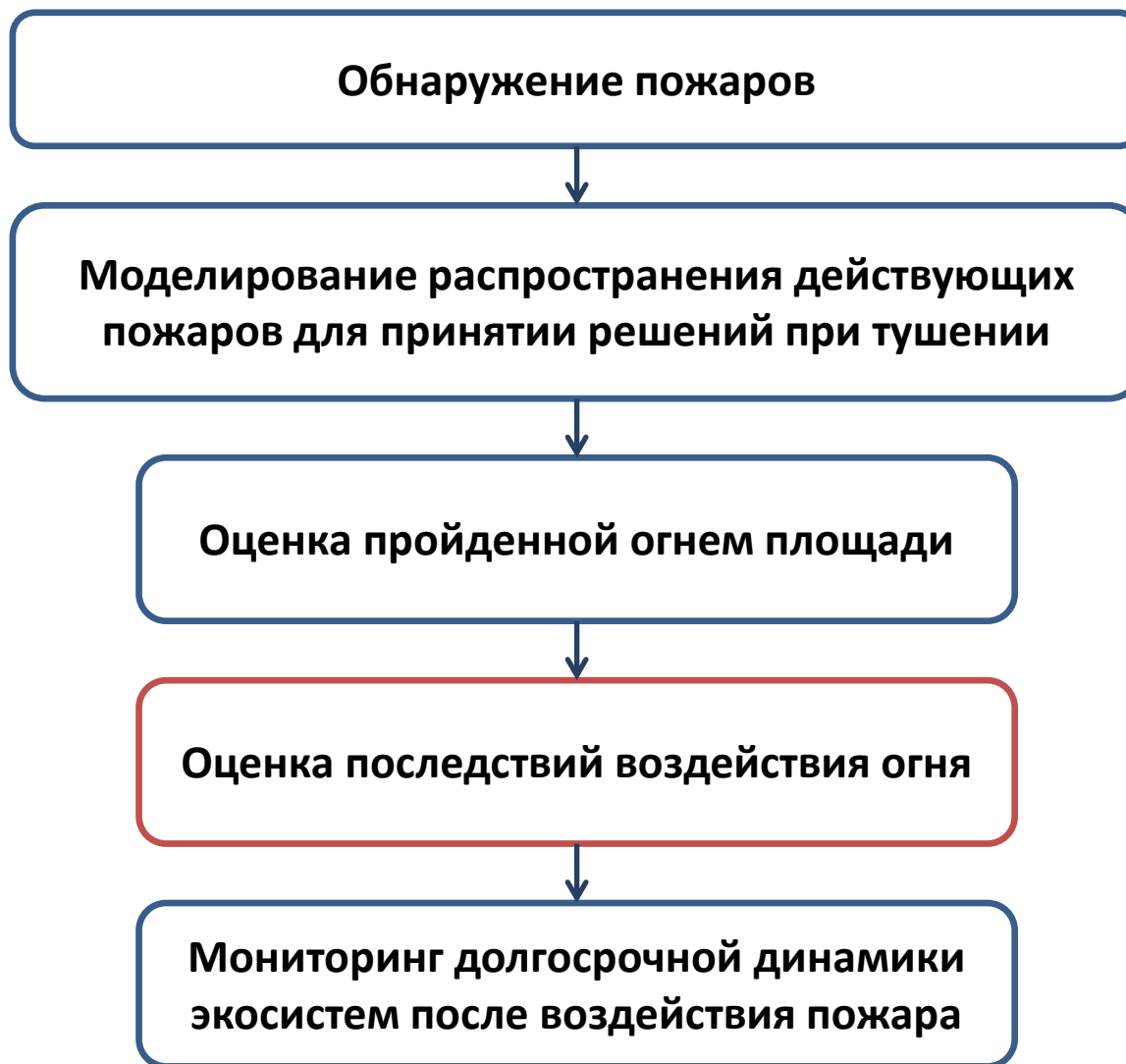


Необходимость спутникового мониторинга пожаров

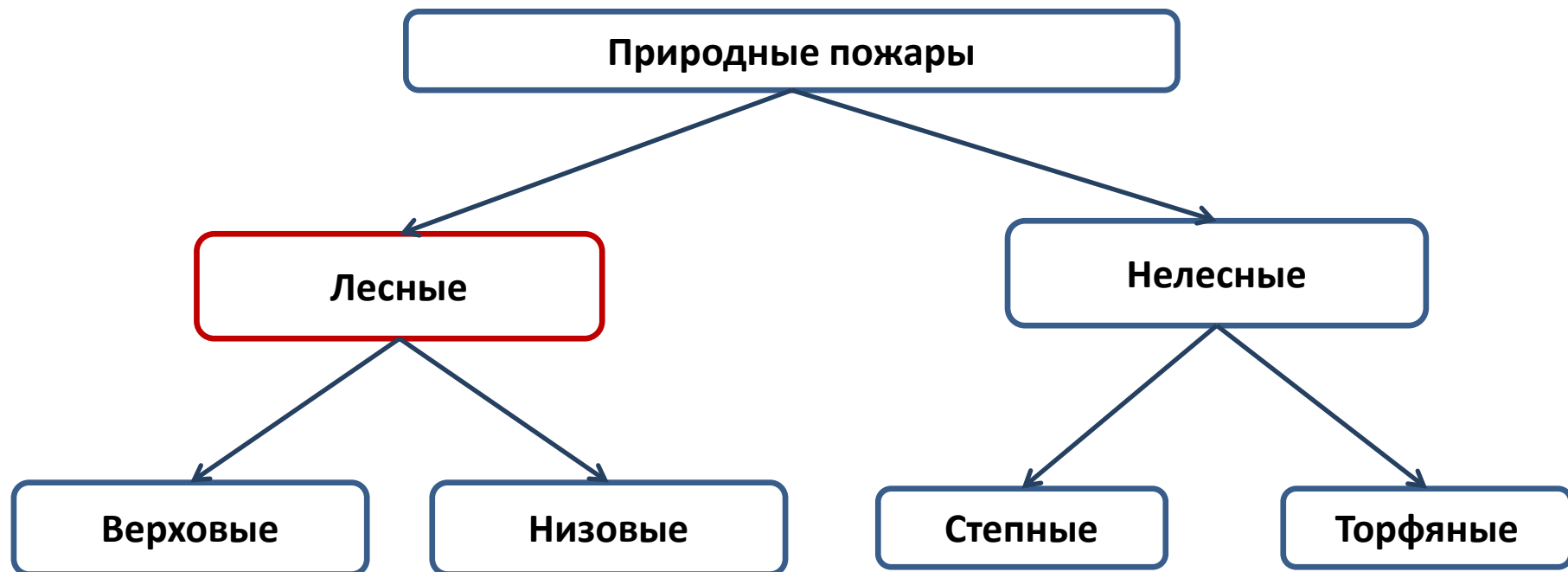


1. Оперативные задачи, связанные с тушением и задачи, связанные с лесным хозяйством (принятие решений);
2. Изучение самого явления и его влияния на экосистемы;
3. Изучение эмиссии парниковых газов и баланса углерода;
4. Влияние на задачи мониторинга и картографирования растительности.

Задачи спутникового мониторинга природных пожаров



Виды природных пожаров

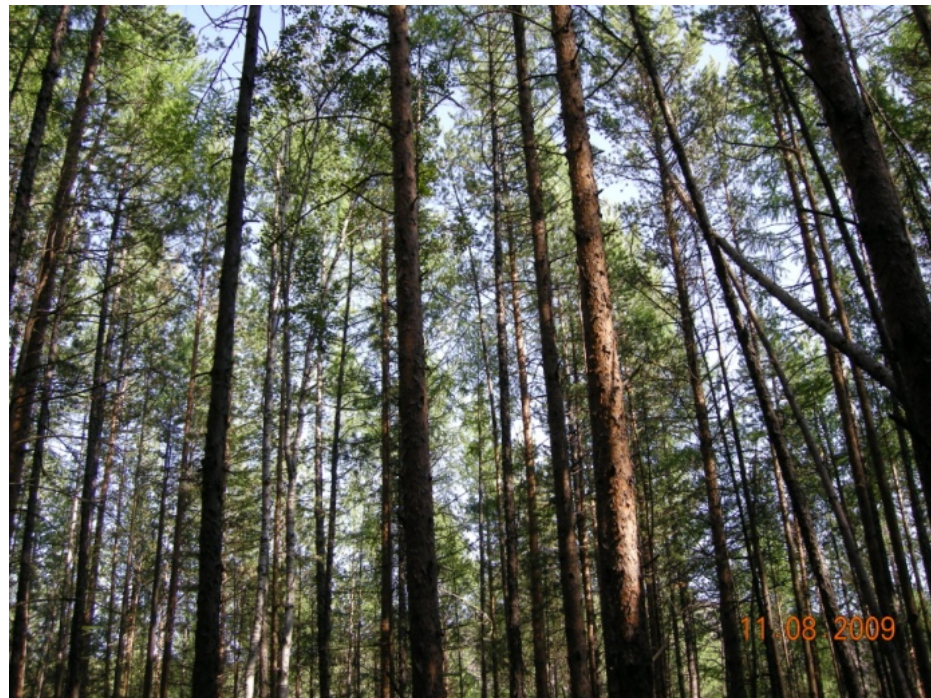


Последствия воздействия огня на лесные экосистемы

Выборочные лесопатологические обследования лесных пожаров в Читинской области



Лес отнесен к категории “погибшие”.



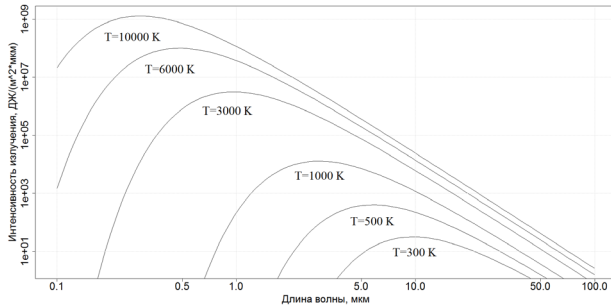
Лес отнесен к категории “здоровые”.

Основные подходы к мониторингу природных пожаров на основе спутниковых данных

Методы изучения природных пожаров на основе спутниковых данных

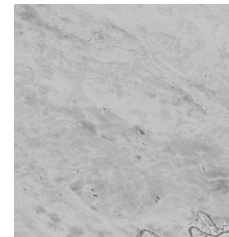
Методы основанные на наблюдении процесса горения по тепловым данным

Методы основанные на детектирование изменений отражательных свойств после окончания горения по оптическим данным

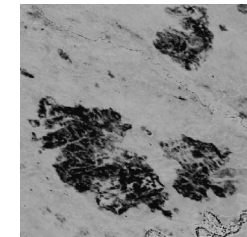


Расчет яркостной температуры на основе закона Планка с последующим детектированием и оценкой пожаров

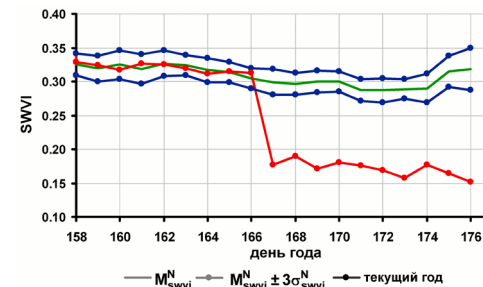
$$T = \frac{hc/k\lambda}{\ln \left(\frac{2hc^2}{L_{\lambda}\lambda^5 \times 10^{-6}} + 1 \right)}$$



До пожара

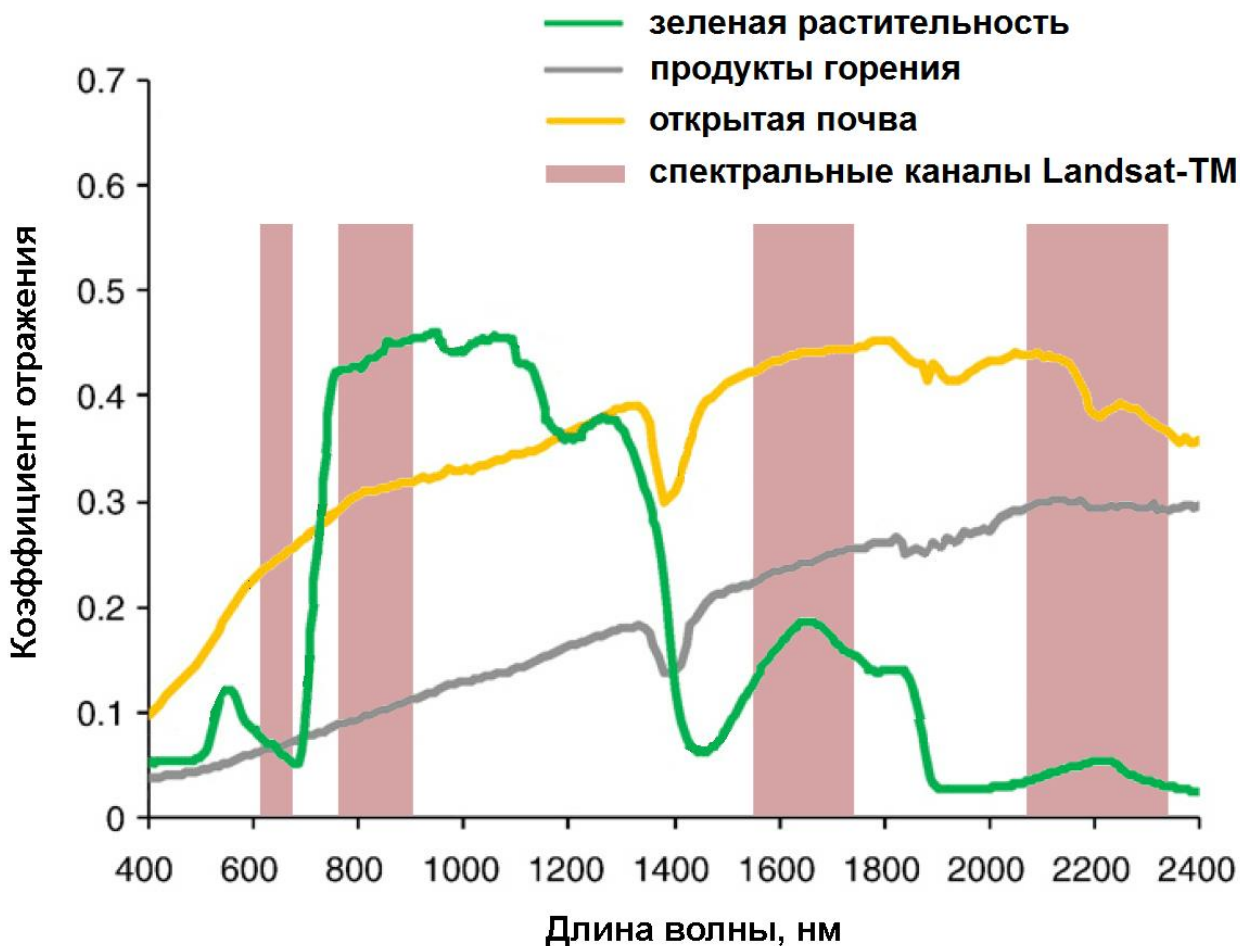


После пожара



Детектирование и оценка изменений

Физические основы мониторинга пожаров по данным ДЗЗ в оптическом диапазоне



Отражательная способность растительности, открытой почвы и продуктов горения (De Santis et al, 2009), а также спектральные каналы Landsat-TM

Вегетационные индексы, используемые для оценки последствия воздействия огня

$$NDVI = \frac{R_{nir} - R_{red}}{R_{nir} + R_{red}}$$

(Rouse et al, 1973)

$$SWVI = \frac{R_{nir} - R_{sswir}}{R_{nir} + R_{sswir}}$$

(Gao 1996)

$$NBR = \frac{R_{nir} - R_{lswir}}{R_{nir} + R_{lswir}}$$

(Key and Benson, 1999)

R_{red} – отражательная способность в красном канале (0.65 мкм)

R_{nir} – отражательная способность в ближнем ИК канале (0.8 мкм)

R_{sswir} - отражательная способность в среднем ИК канале (1.6 мкм)

R_{lswir} - отражательная способность в среднем ИК канале (2.2 мкм)

Разностные индексы:

$$dVI = VI_{pre} - VI_{post}$$

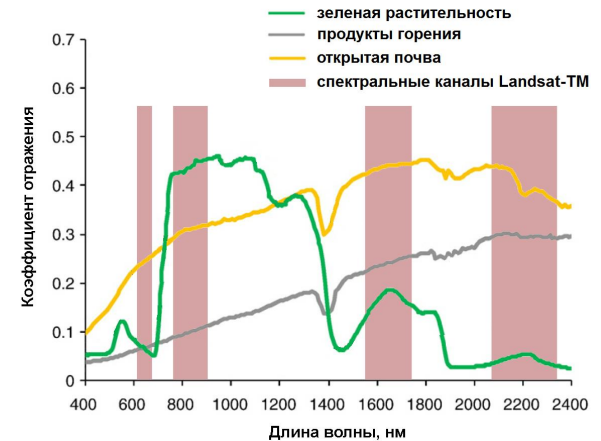
где VI_{pre} и VI_{post} - значения вегетационного индекса ($NDVI$, $SWVI$ и др.) лесного покрова соответственно до и после пожара.

(Brewer et al., 2005, Epting et al., 2005, Thode, 2005)

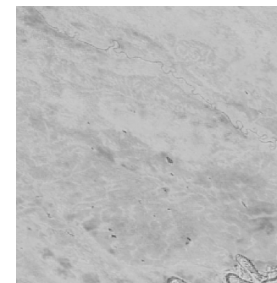
Относительные разностные индексы:

$$RdVI = \frac{VI_{pre} - VI_{post}}{\sqrt{VI_{pre}}}$$

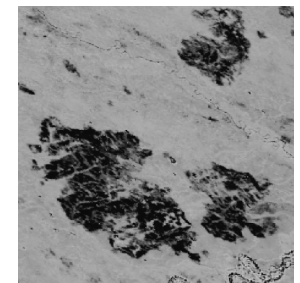
(Miller and Thode, 2007)



Отражательная способность растительности, открытой почвы и продуктов горения (De Santis et al, 2009), а также спектральные каналы Landsat-TM

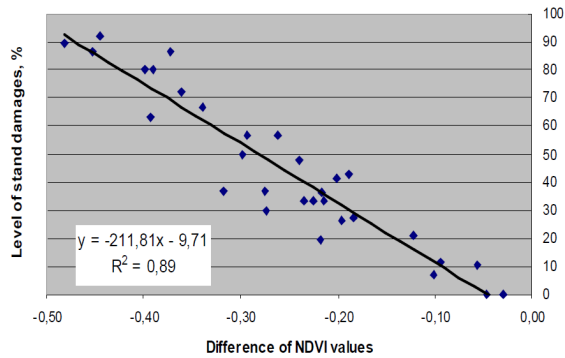


Допожарное изображение индекса SWVI

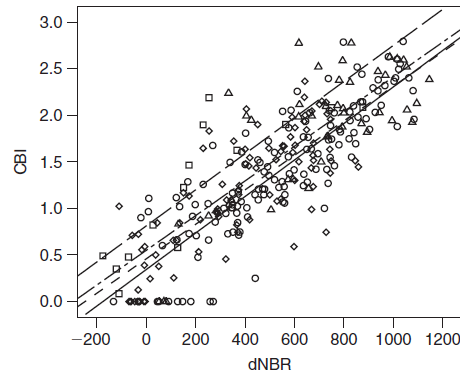


Изображение индекса SWVI с пройденными огнем площадями

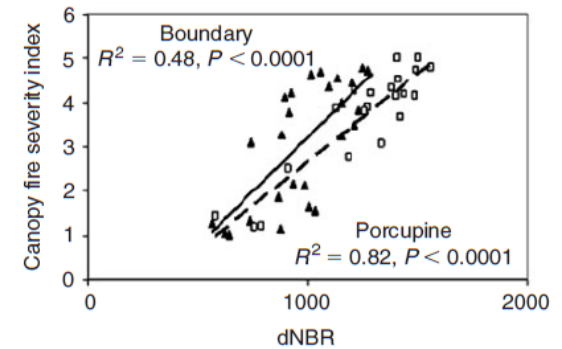
Оценка последствий воздействия огня на лесные экосистемы на основе спутниковых данных



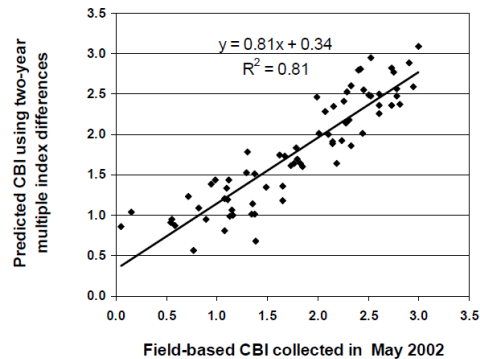
Социлова, Ершов, 2007



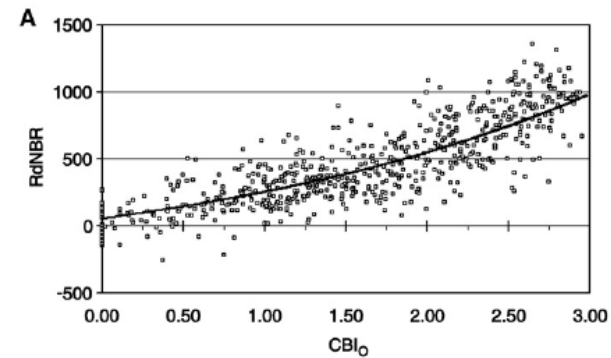
Allen and Sorbel, 2008



Hoy et. al, 2008



Chen et. al, 2008



Miller et. al, 2009

Параметр средневзвешенной категории состояния

Для лесонасаждения параметр средневзвешенной категории состояния (СКС) рассчитывается следующим образом:

$$СКС = \frac{P_1 K_1 + P_2 K_2 + P_3 K_3 + P_4 K_4 + K_5 (P_5 + P_6)}{100}$$

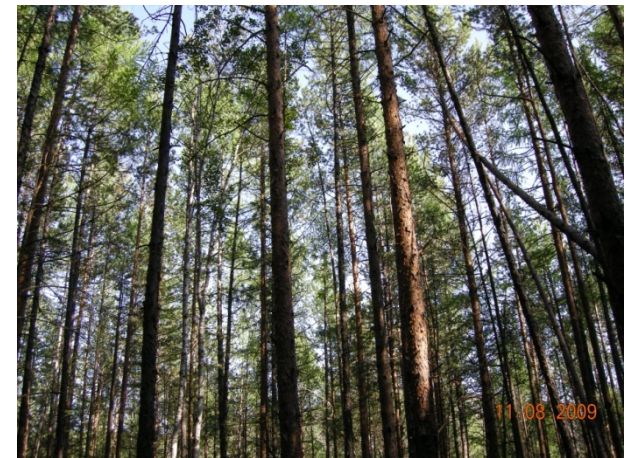
P_i - доля каждой категории состояния в процентах;
 K_i - индекс категории состояния дерева.

При оценке состояния лесонасаждений выделяют пять классов на основе следующих градаций СКС:

- здоровые (СКС < 1,5);
- ослабленные (СКС = 1,5-2,5);
- сильно ослабленные (СКС = 2,5-3,5);
- усыхающие (СКС = 3,5-4,5);
- погибшие (СКС > 4,5).



СКС = 4,9



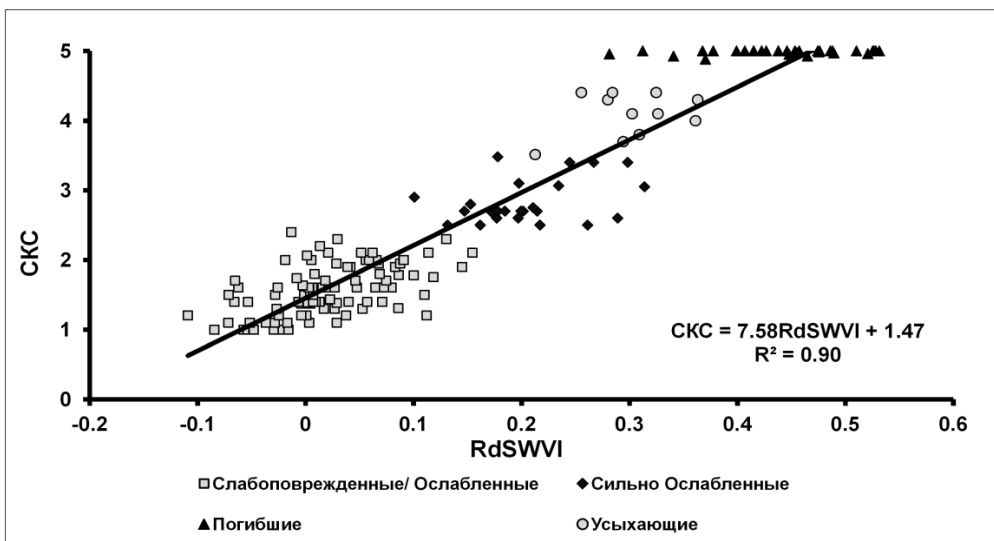
СКС = 1,4

Анализ взаимосвязей повреждений лесов пожарами и разновременных спутниковых индексов

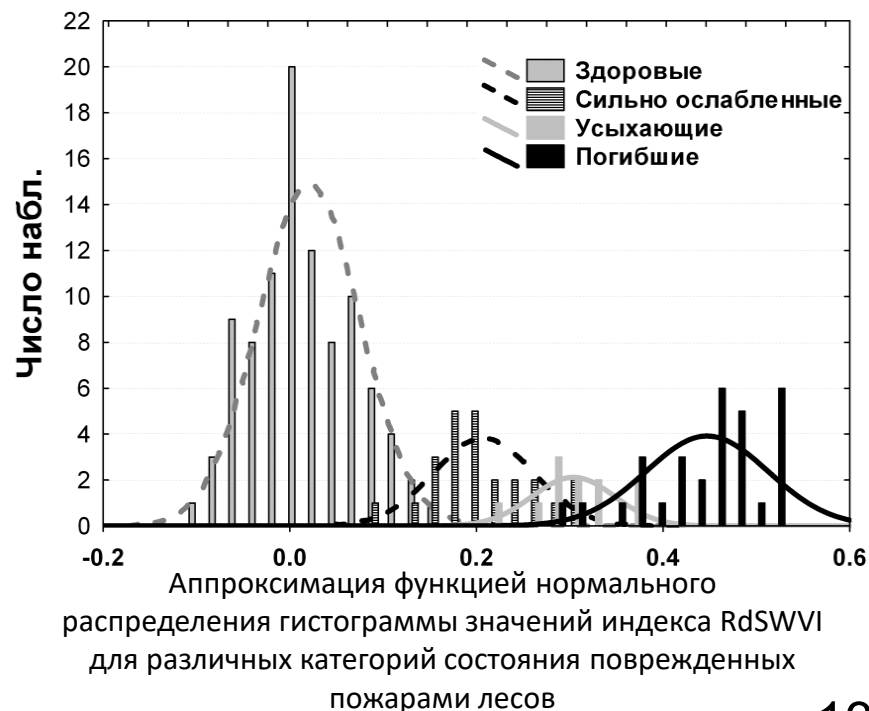
Разновременный спутниковый индекс RdSWVI (relative difference short wave vegetation index) показал наилучшую корреляцию со степенью повреждения лесов пожарами:

$$RdSWVI = \frac{SWVI_{pre} - SWVI_{post}}{\sqrt{SWVI_{pre} + 1}}$$

$SWVI_{pre}$ и $SWVI_{post}$ - значения спутникового индекса до и после воздействия пожара



Взаимосвязь между значениями вегетационного индекса RdSWVI по данным Landsat-TM и CKC поврежденных пожарами лесов по результатам наземного обследования



Метод оценки погибших и поврежденных пожарами лесов на основе спутниковых данных MODIS



Вспомогательные тематический продукты



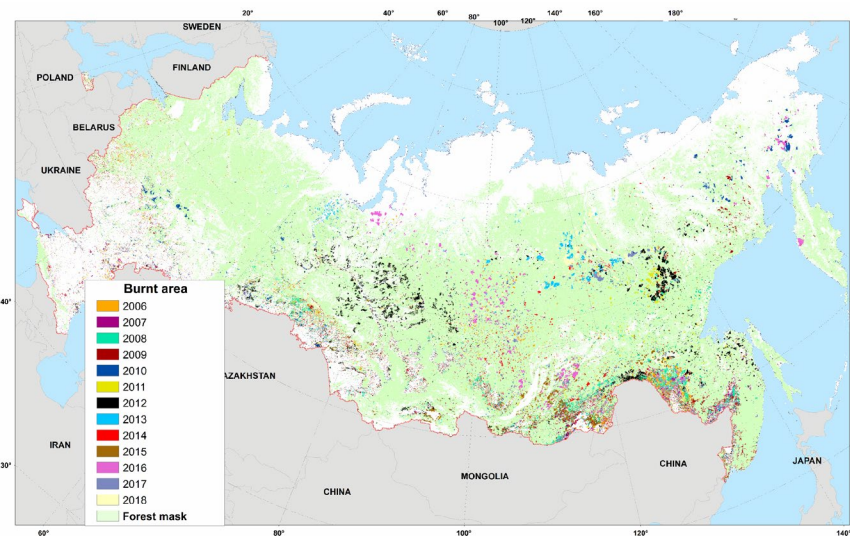
**УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ
ТИПЫ НАЗЕМНЫХ ЭКОСИСТЕМ:**

ЛЕСА:	ТРАВНО-КУСТАРИКОВАЯ РАСТИТЕЛЬНОСТЬ:	ТУНДРА:	НЕ ПОКРЫТЫЕ РАСТИТЕЛЬНОСТЬЮ ЗЕМЛИ:
Темнохвойные вечнозеленые	Лука	Кустарничко-лесная	Открытые степи и выжиганные почвы
Светлохвойные вечнозеленые	Степи	Осококовая	Водные объекты
Лиственные	Хвойные вечнозеленые кустарники	Кустарничковая	Урбанизированные территории
Смешанные с преобладанием хвойных	Листоногие кустарники	ПРОЧАЯ РАСТИТЕЛЬНОСТЬ:	Вечные снега и льды
Смешанные	ВОДНО-БОЛОТНЫЕ КОМПЛЕКСЫ:	Гари	
Смешанные с преобладанием лиственных	Болота	Пашенные земли	
Хвойные листопадные (лиственничные)	Прибрежная растительность		
Родины хвойных листопадных			

Карты растительного покрова на территорию России

Содержит основные классы растительного покрова для всей территории России, включая лесные классы с пространственным разрешением 230м.

(Барталев и др., 2011, Барталев и др. 2016)



Ежегодные данные о пройденных огнем площадях

Содержит информацию о пройденных огнем площадях, детектированных на основе оптических данных MODIS с пространственным разрешением 230м. Содержит информацию о дате детектирования пожара в каждом пикселе.

(Егоров 2006, Барталев и др., 2012)

Описание использованных параметров, полученных на основе спутниковых изображений

$$SWVI = \frac{R_{nir} - R_{swir}}{R_{nir} + R_{swir}}$$

где R_{nir} и R_{swir} - соответственно значения коэффициента отражения земной поверхности, измеренные в ближнем и среднем ИК каналах.

$M_{swvi}^N(\Theta^*, t)$, $\sigma_{swvi}^N(\Theta^*, t)$ оценка среднего многолетнего значения и стандартного отклонения индекса для каждого пиксела с координатами Θ^* в день года t .

$$M_{swvi}^N(\Theta^*, t) = \frac{1}{N} \sum_{y=1}^Y \sum_{t-\Delta t}^{t+\Delta t} SWVI(\Theta^*, t, y)$$

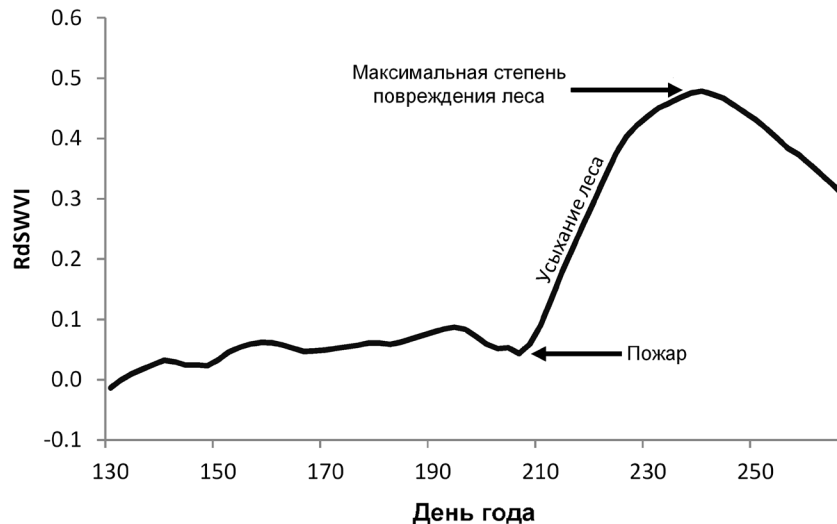
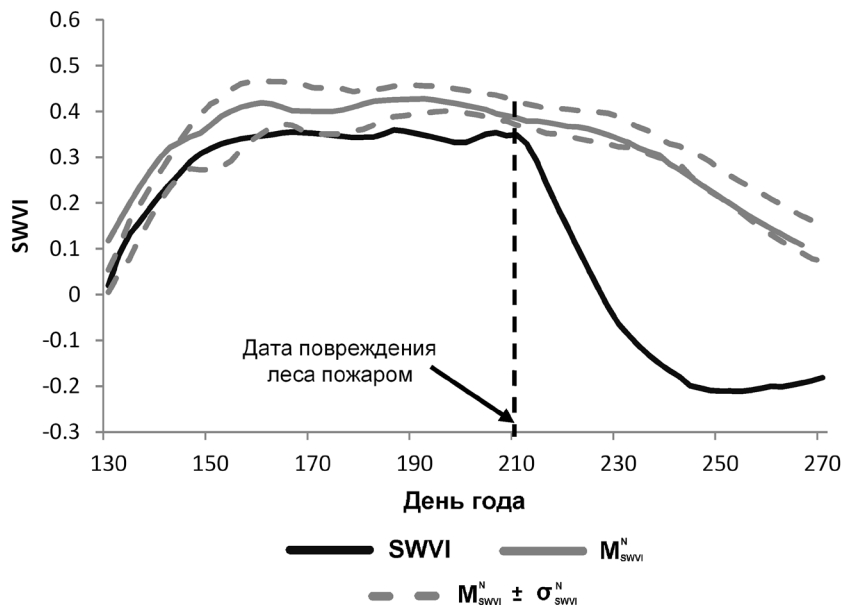
$$\sigma_{swvi}^N(\Theta^*, t) = \frac{1}{N} \left(\sum_{y=1}^Y \sum_{t-\Delta t}^{t+\Delta t} (SWVI(\Theta^*, t, y) - M_{swvi}^N(\Theta^*, t))^2 \right)^{1/2}$$

где y - индекс года внутри опорного периода продолжительностью $Y=5$;

$\Delta t = 3$ - ширина временного скользящего окна для статистической оценки внутригодовой динамики индекса $SWVI$;

$N = Y(2\Delta t + 1) = 35$ - общее количество измерений, использующихся при оценке индекса $SWVI$ для заданного пиксела в день t .

Примеры сезонной динамики SWVI и RdSWVI поврежденного пожаром леса.



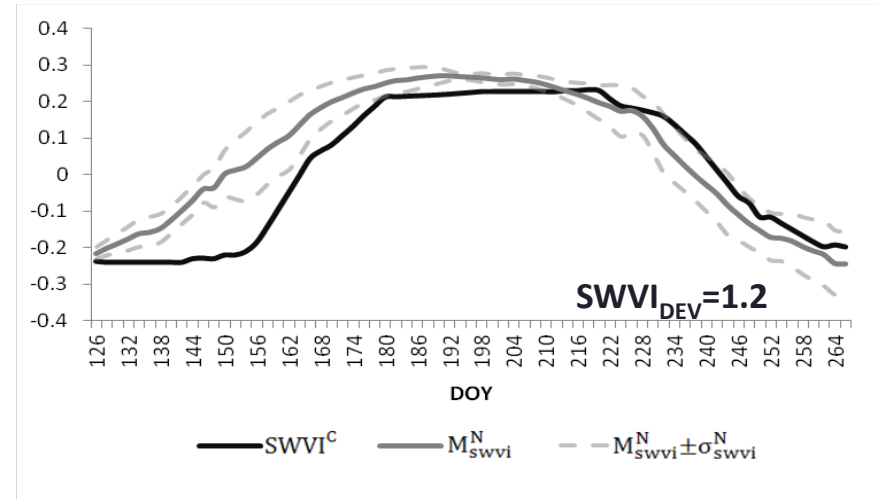
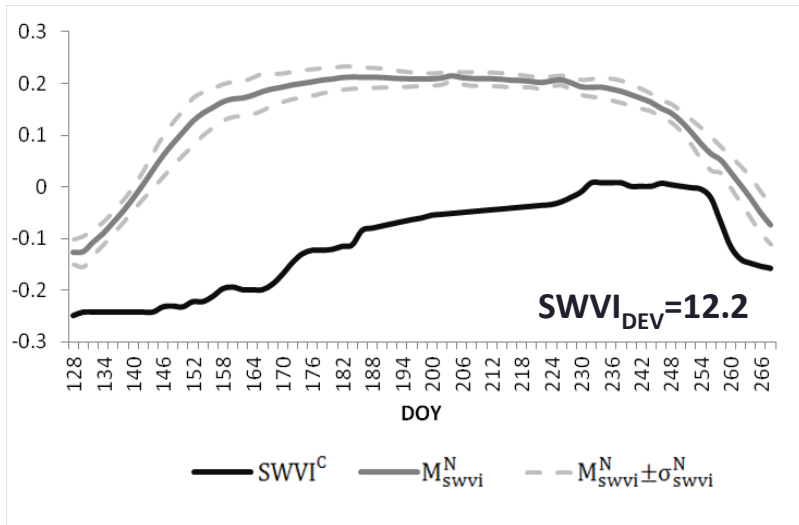
Временной ряд индекса RdSWVI рассчитывается следующим образом:

$$RdSWVI_{(\Theta^*, t)} = \frac{M_{SWVI}^N(\Theta^*, t) - SWVI^C(\Theta^*, t)}{\sqrt{M_{SWVI}^N(\Theta^*, t) + 1}}$$

Пересчет значений RdSWVI в показатель СКК производится на основе установленной зависимости:

$$CKC_{(\Theta^*, t)} = 7.85RdSWVI_{(\Theta^*, t)} + 1.47$$

Выявление изменений со слабыми последствиями



$$SWVI_{DEV} = \frac{\sum_n^{n+\Delta n} \frac{M_{swvi}^N(\Theta^*, t) - SWVI^C(\Theta^*, t)}{\sigma_{swvi}^N(\Theta^*, t)}}{\Delta n}$$

Δn - количество дней с доступными измерениями после дня пожара n

$\sigma_{swvi}^N(\Theta^*, t)$ - стандартное отклонение индекса для каждого пиксела с в день года t .

(Стыценко и др., 2013)

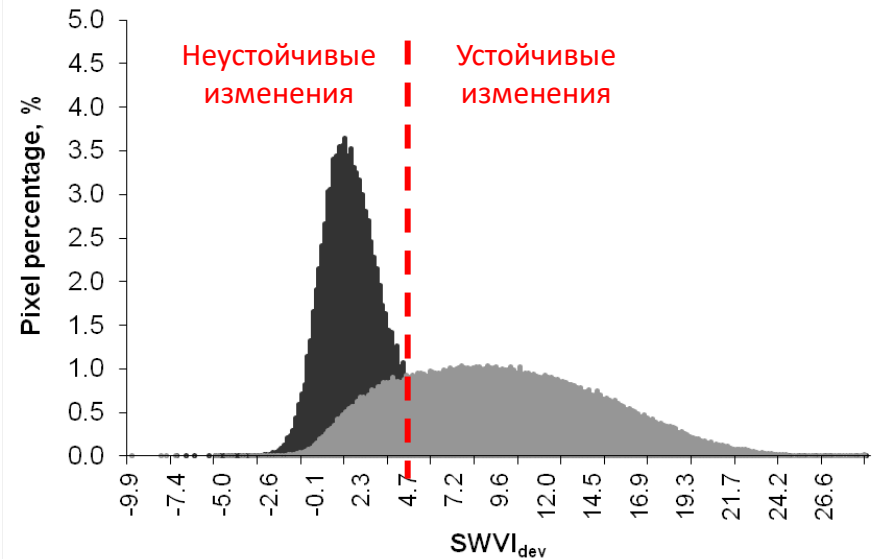
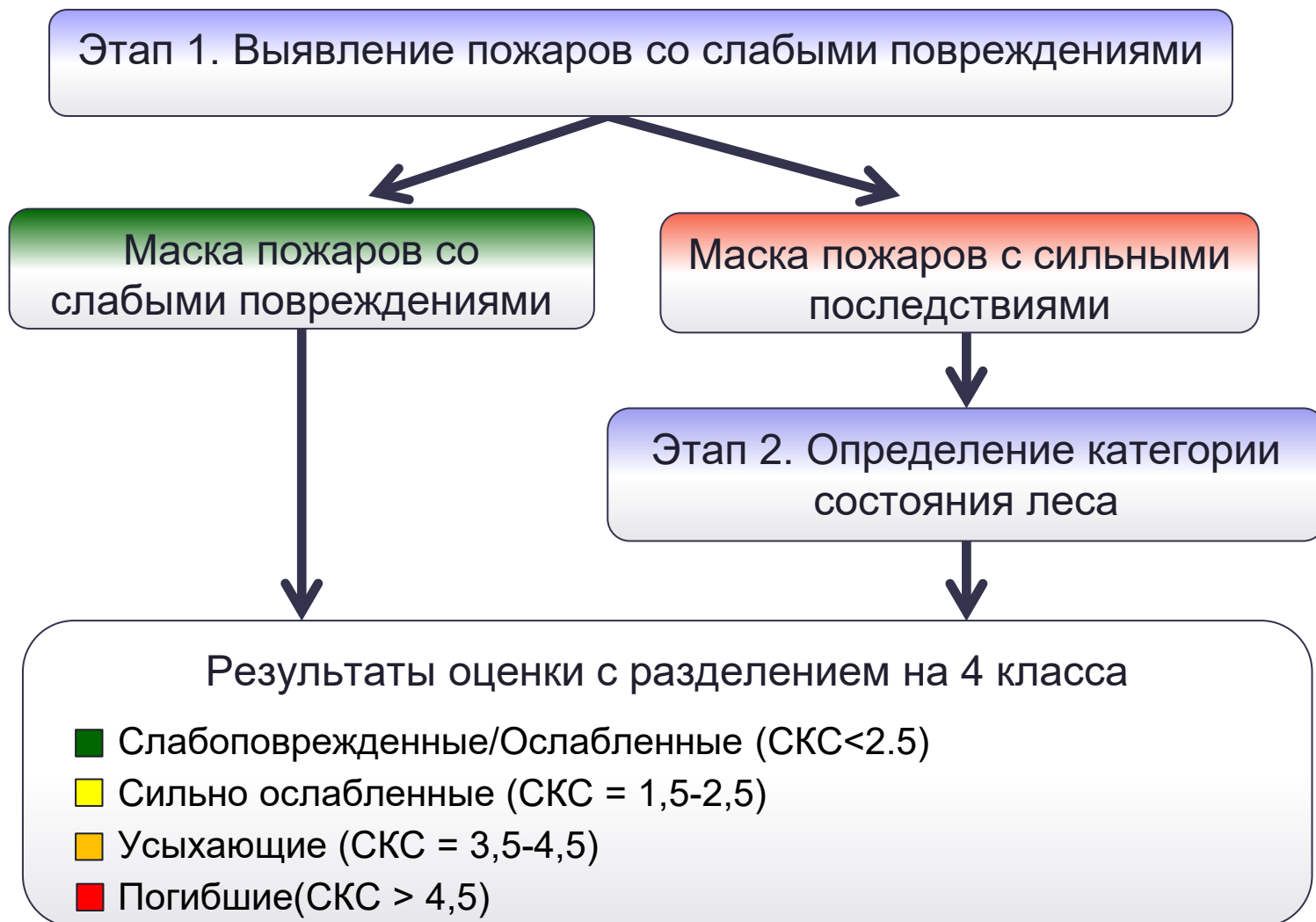


Схема оценки степени повреждения лесов пожарами



Создание технологии ежегодной оценки погибших и поврежденных пожарами лесов на основе спутниковых данных

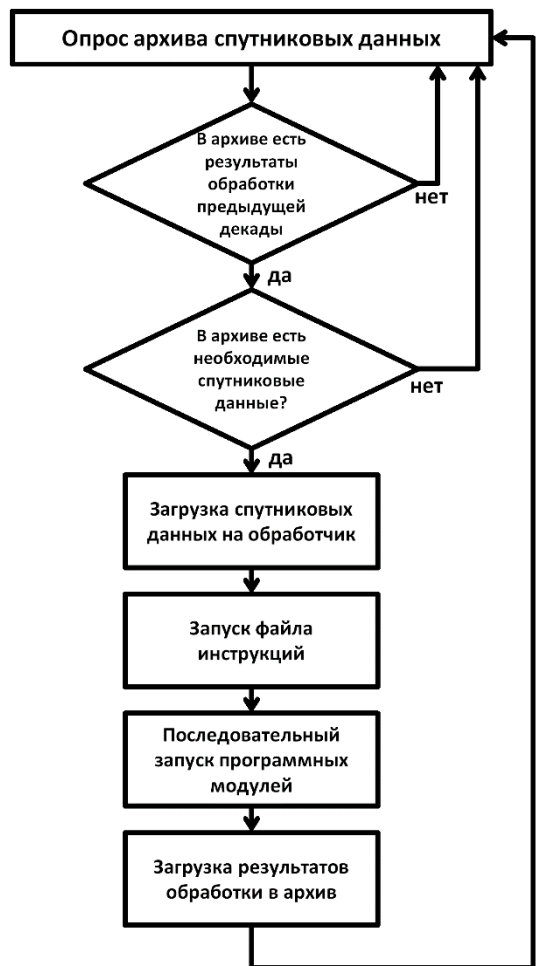
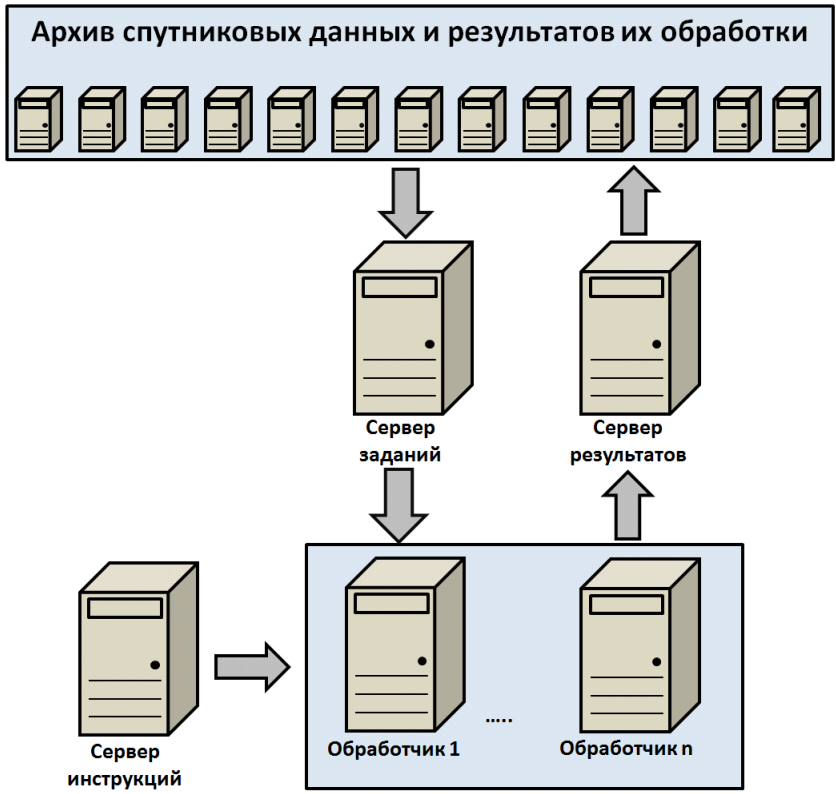


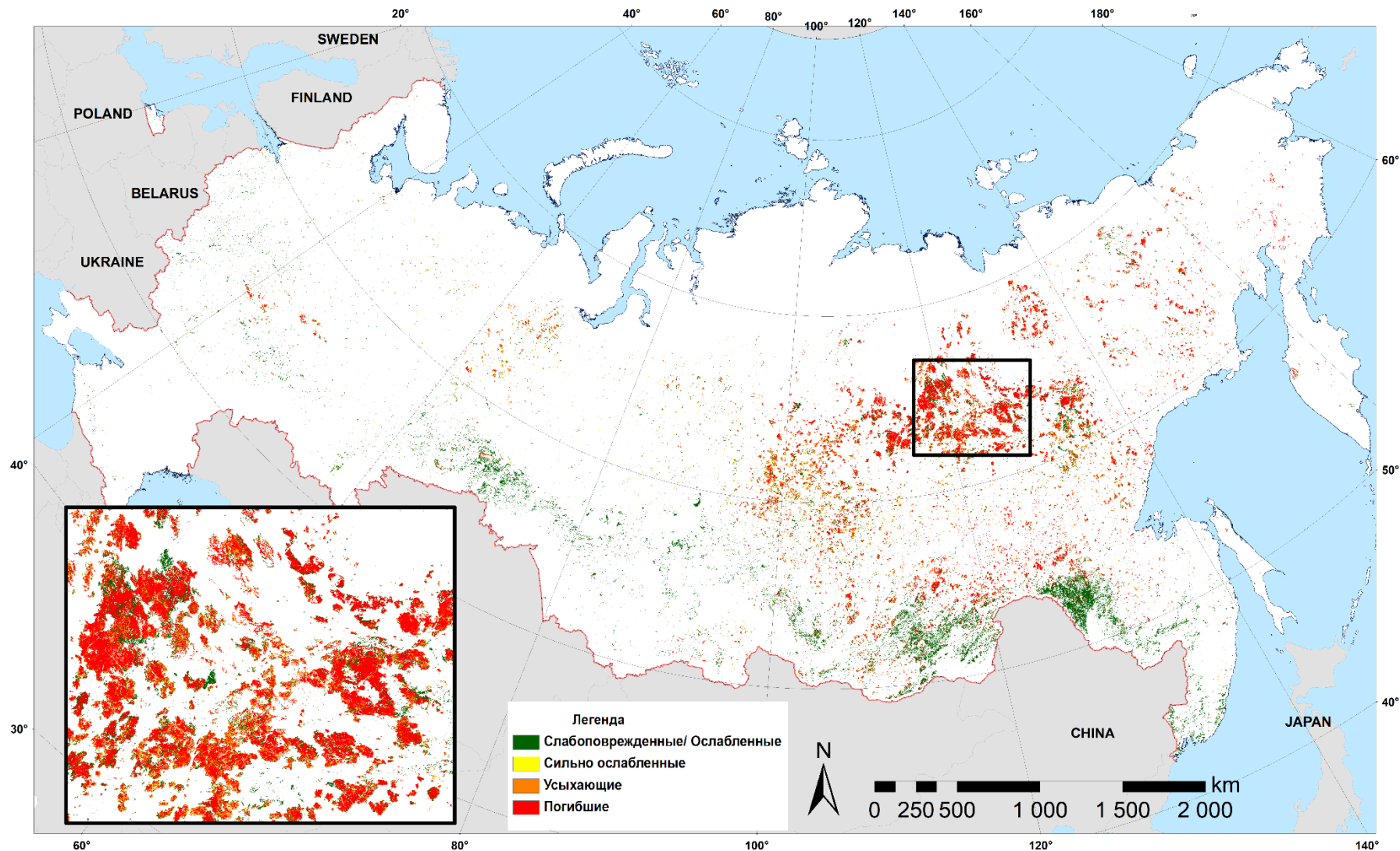
Схема реализации технологии оперативной дистанционной оценки пирогенной гибели лесов России



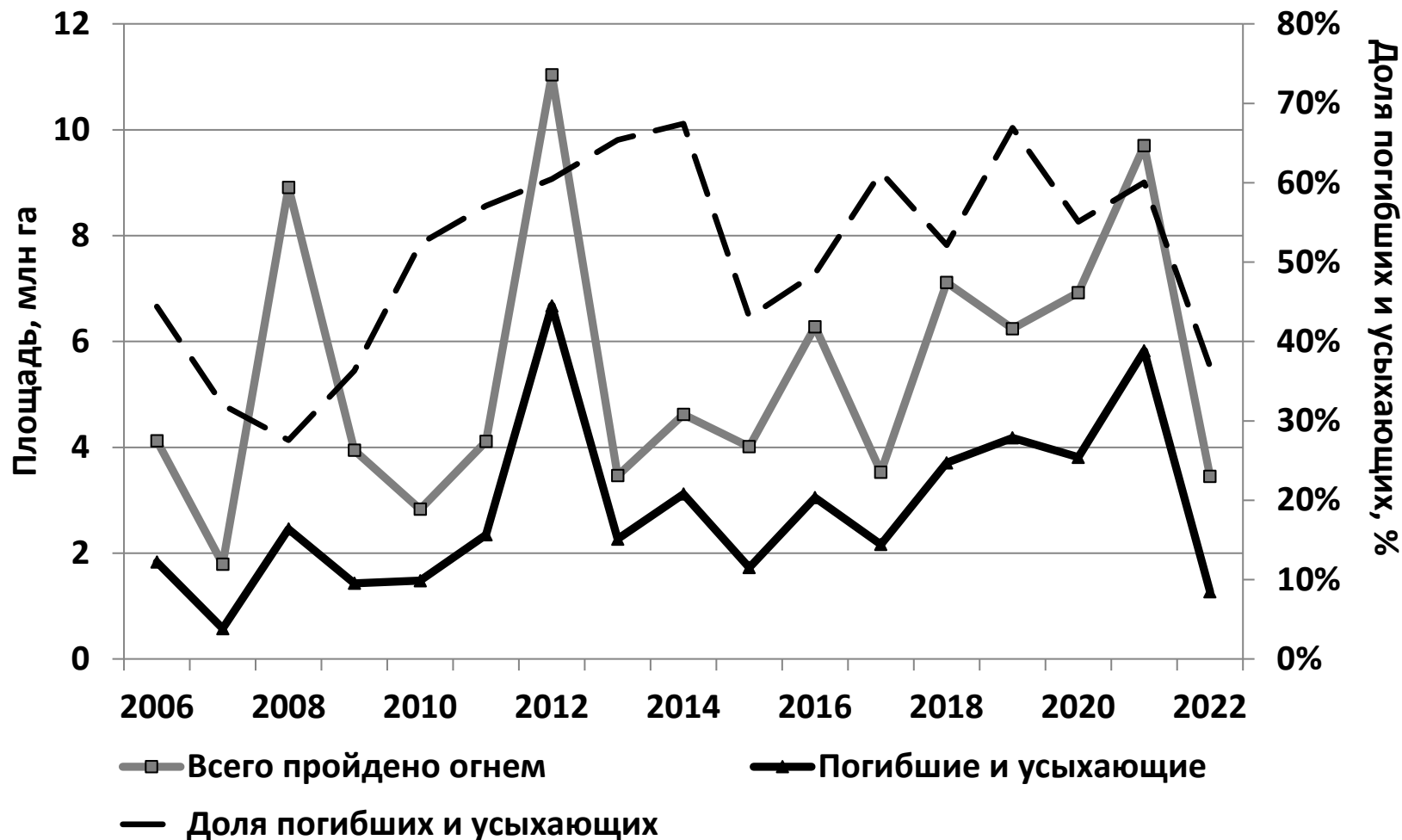
Аппаратная архитектура автоматической технологии оценки степени повреждения лесов пожарами

*Используется инфраструктура хранения и обработки спутниковых данных Центра коллективного пользования "ИКИ-Мониторинг" (Лупян и др., 2015)

Карта повреждений лесных экосистем пожарами 2006-2022 гг, полученная на основе анализа постпожарной динамики разновременного индекса RdSWVI

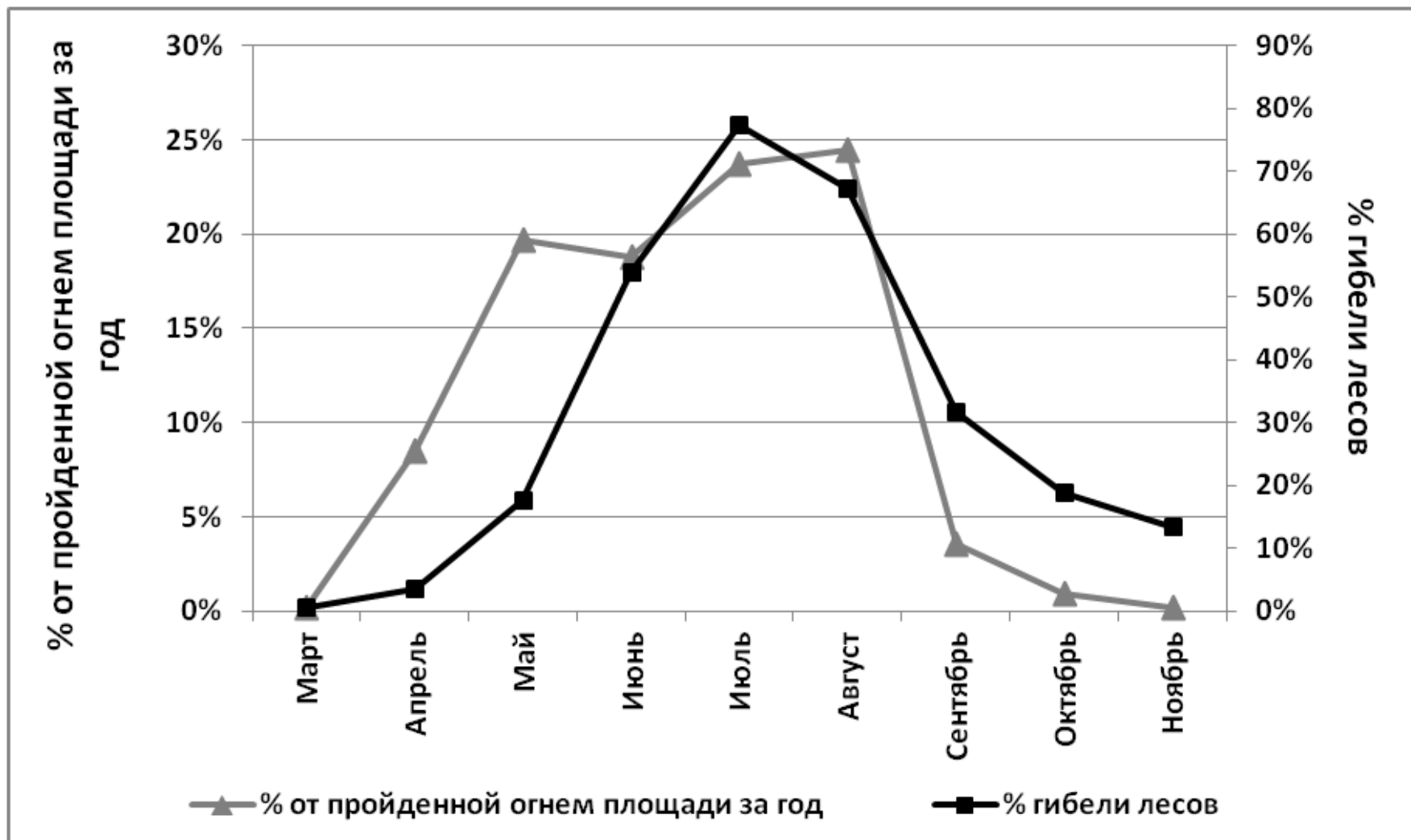


Многолетние вариации характеристик воздействия пожаров на леса России по результатам обработки спутниковых данных

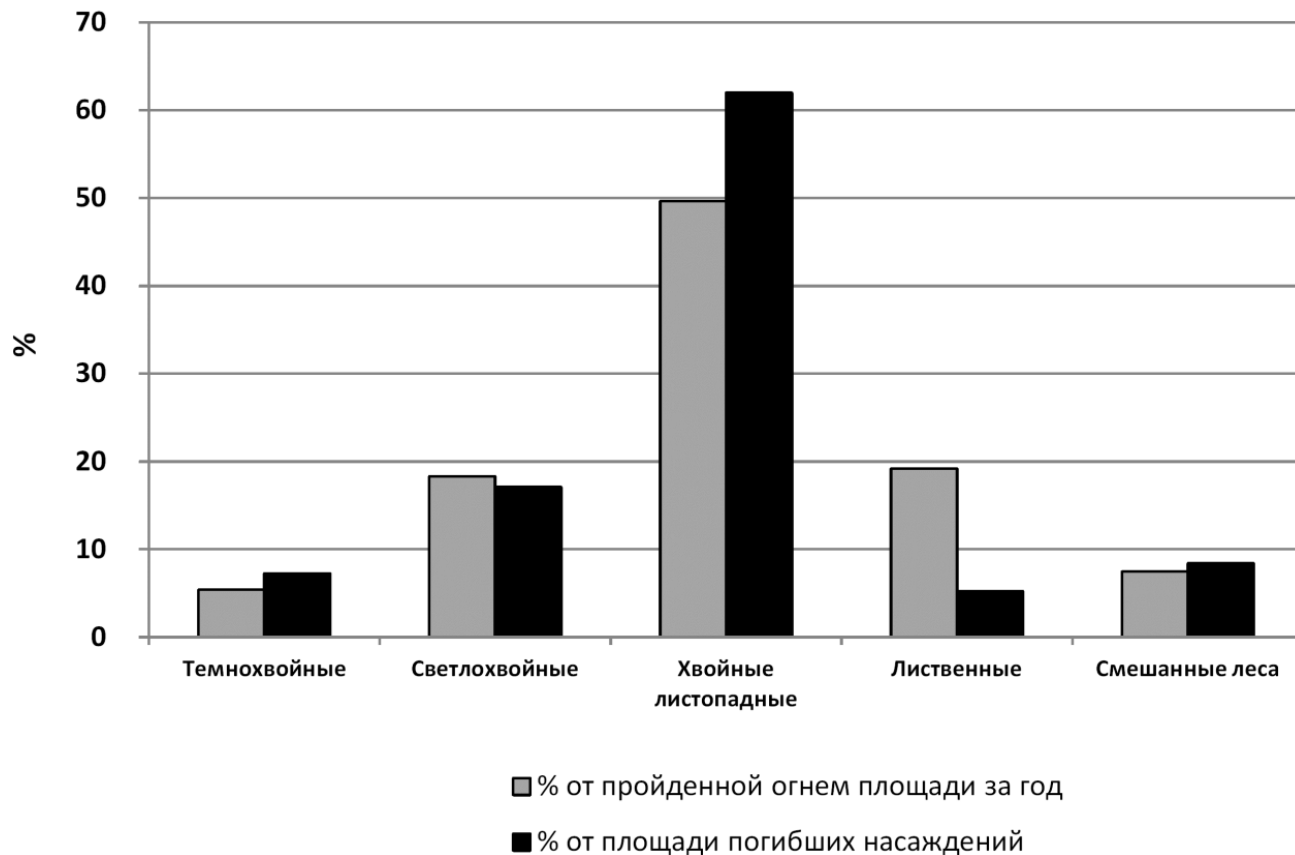


Доля погибших лесов от пройденной огнем их площади колеблется в различные годы в диапазоне от 27,6% до 67,4%, а ее среднемноголетняя величина составляет 52,2%;

Среднемноголетняя сезонная динамика пирогенных повреждений лесов России

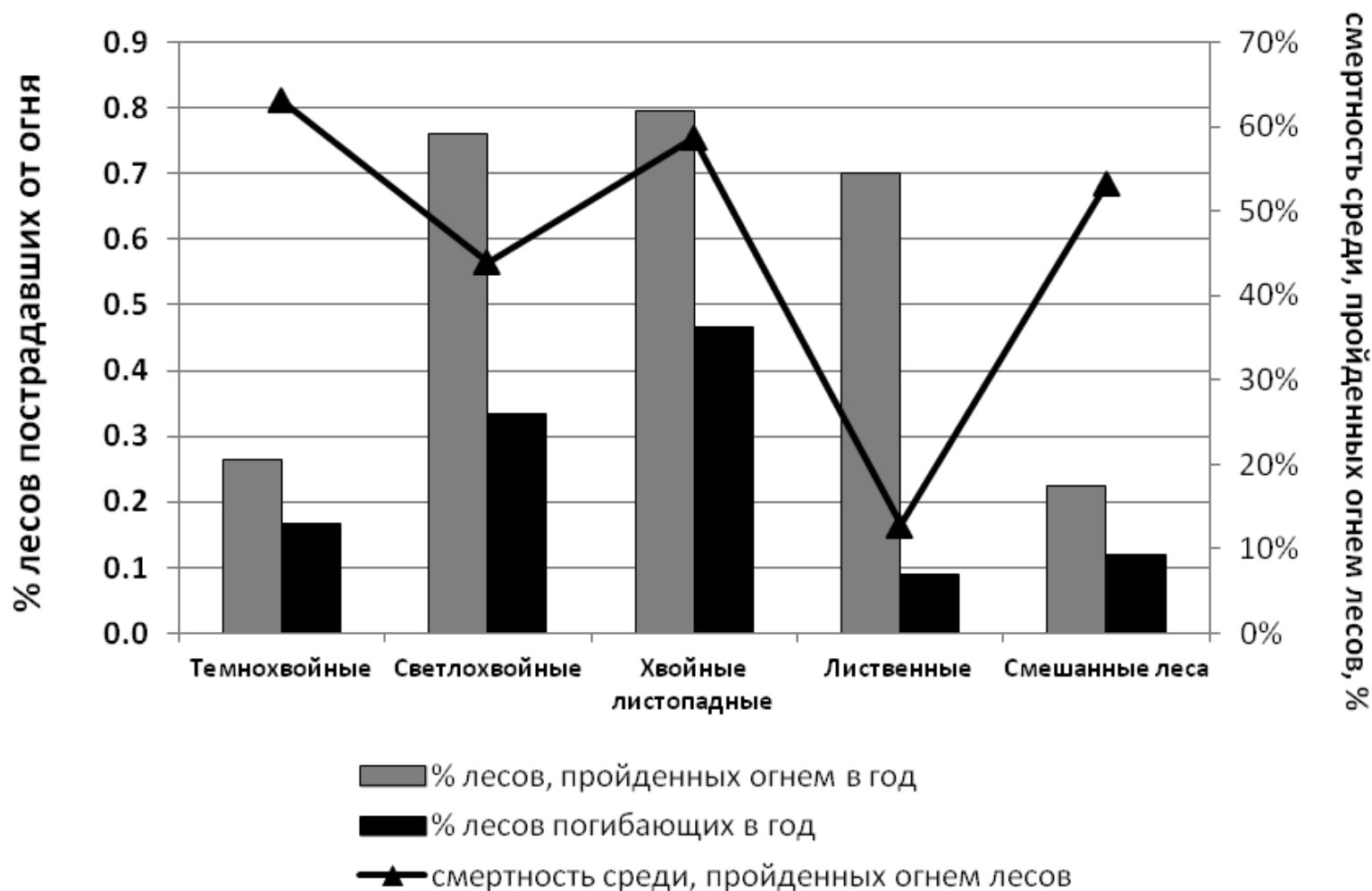


Средняя доля площади ежегодных повреждений и гибели лесов России от пожаров в зависимости от их принадлежности к различным группам древесных пород

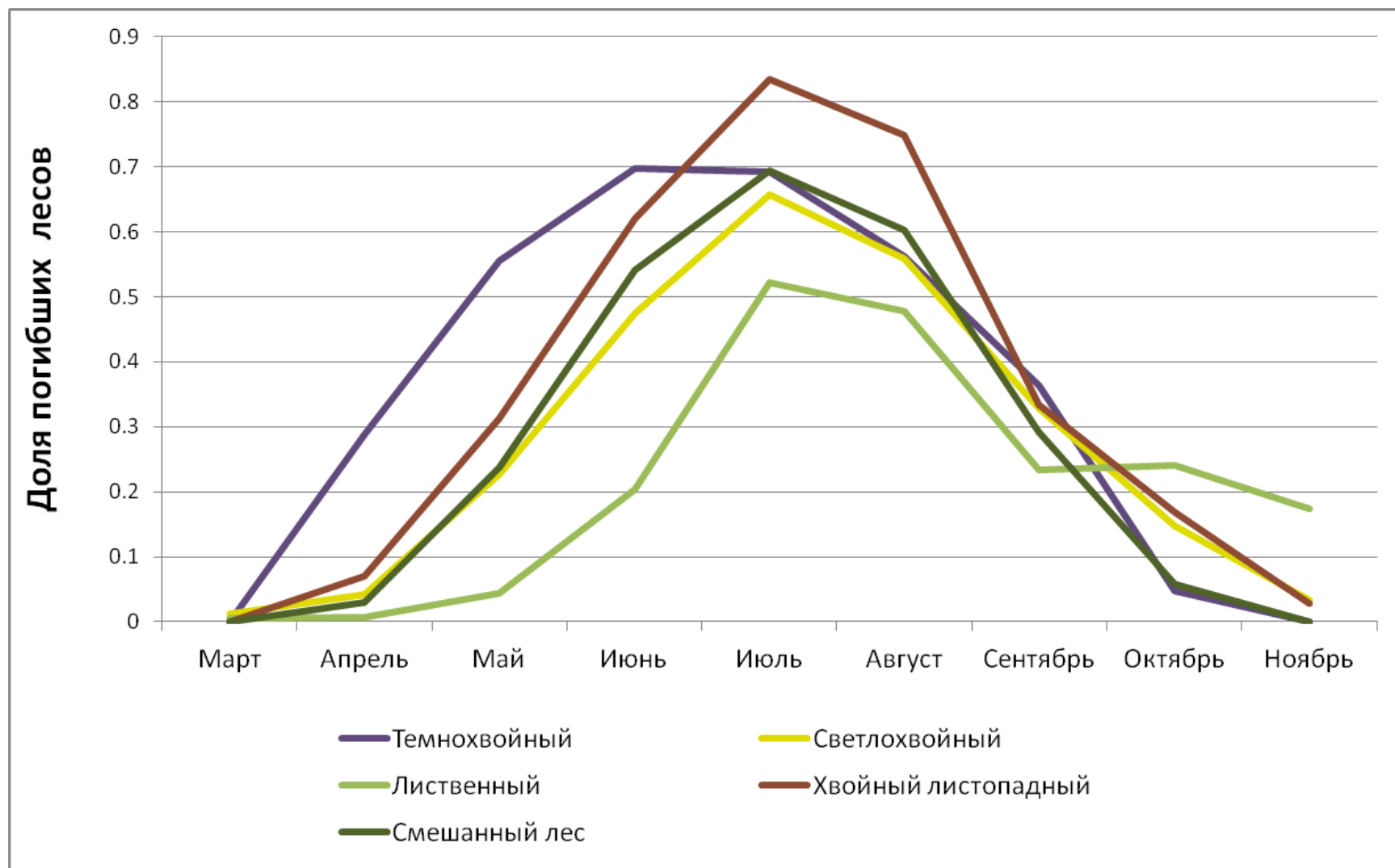


Наибольшая по площади доля (около 50%) лесных пожаров в России повреждает лиственные насаждения, а пожары в темнохвойных лесах охватывают наименьшую площадь (около 5%). Пройденные огнем площади в сосняках и широкой группе лиственных лесов характеризуются примерным равенством и составляют соответственно 18% и 19% от общей площади повреждаемых пожарами лесов.

Средняя доля площади ежегодных повреждений и гибели лесов России от пожаров в зависимости от древесных пород

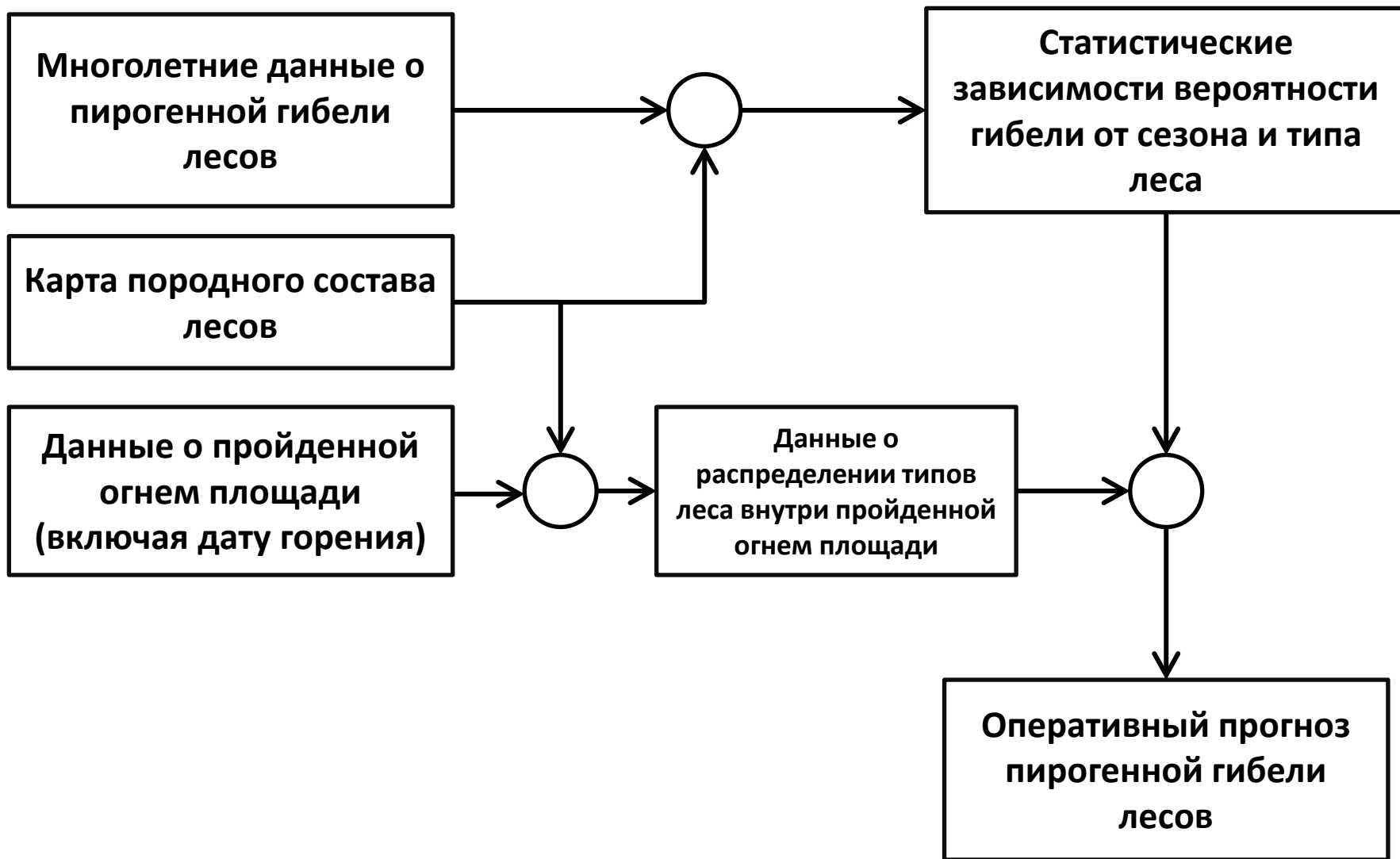


Среднемноголетняя сезонная динамика пирогенной гибели лесов в зависимости от их принадлежности к различным группам древесных пород

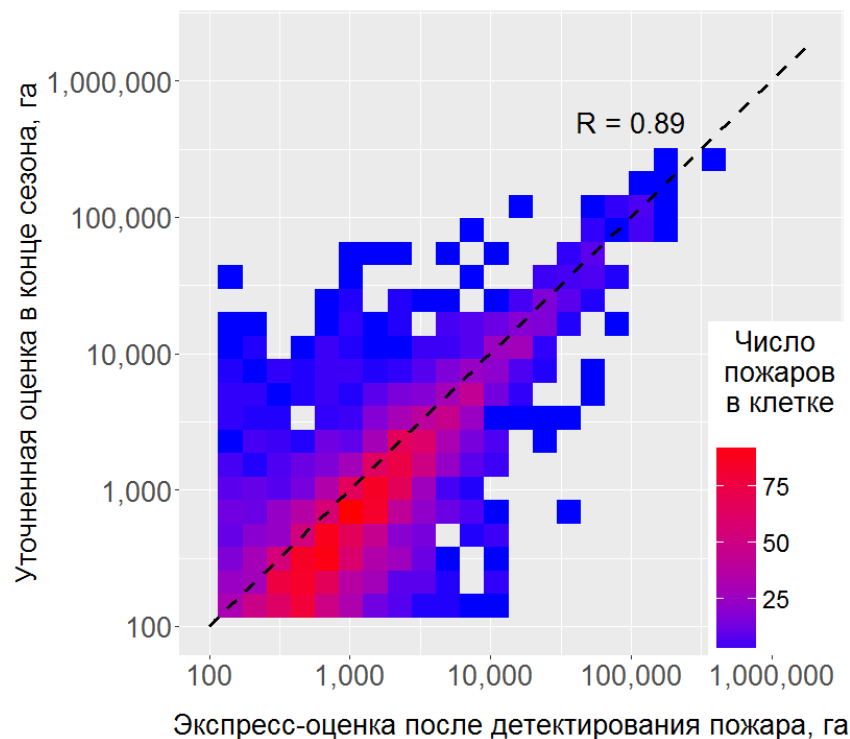
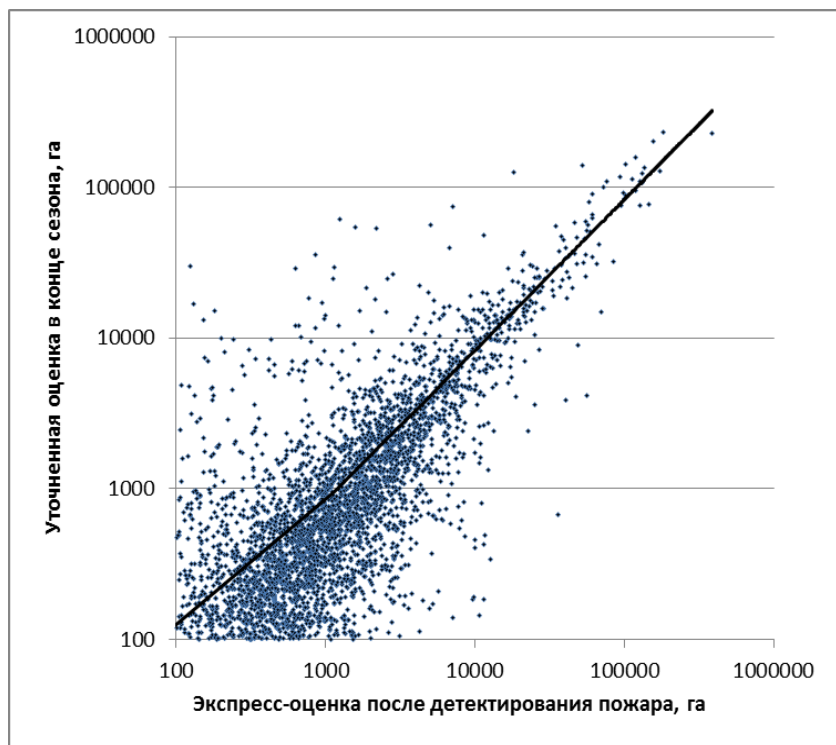


(Барталев и др., 2017)

Принципиальная схема вероятностного прогнозирования пирогенной гибели лесов



Сравнение вероятностного прогнозирования пирогенной гибели лесов и оценки, выполняемой в конце пожароопасного сезона



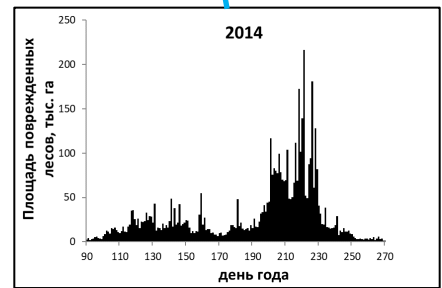
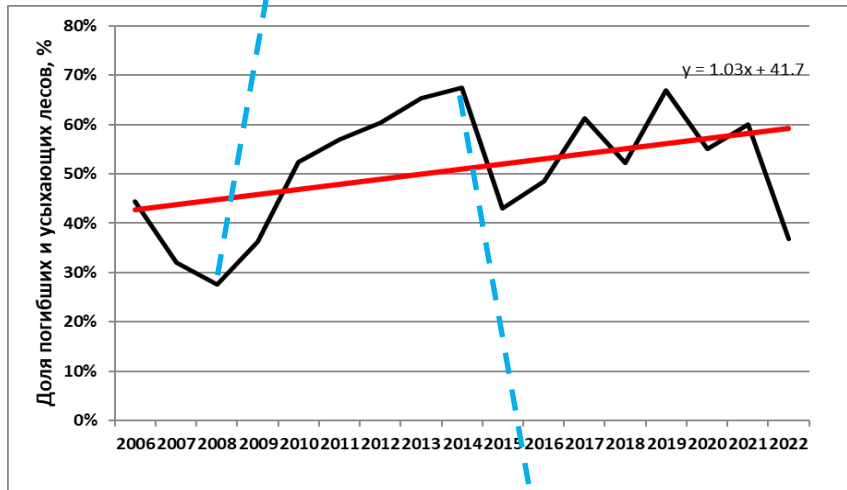
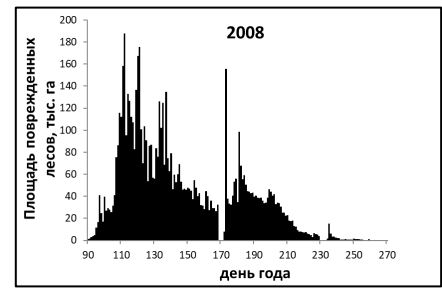
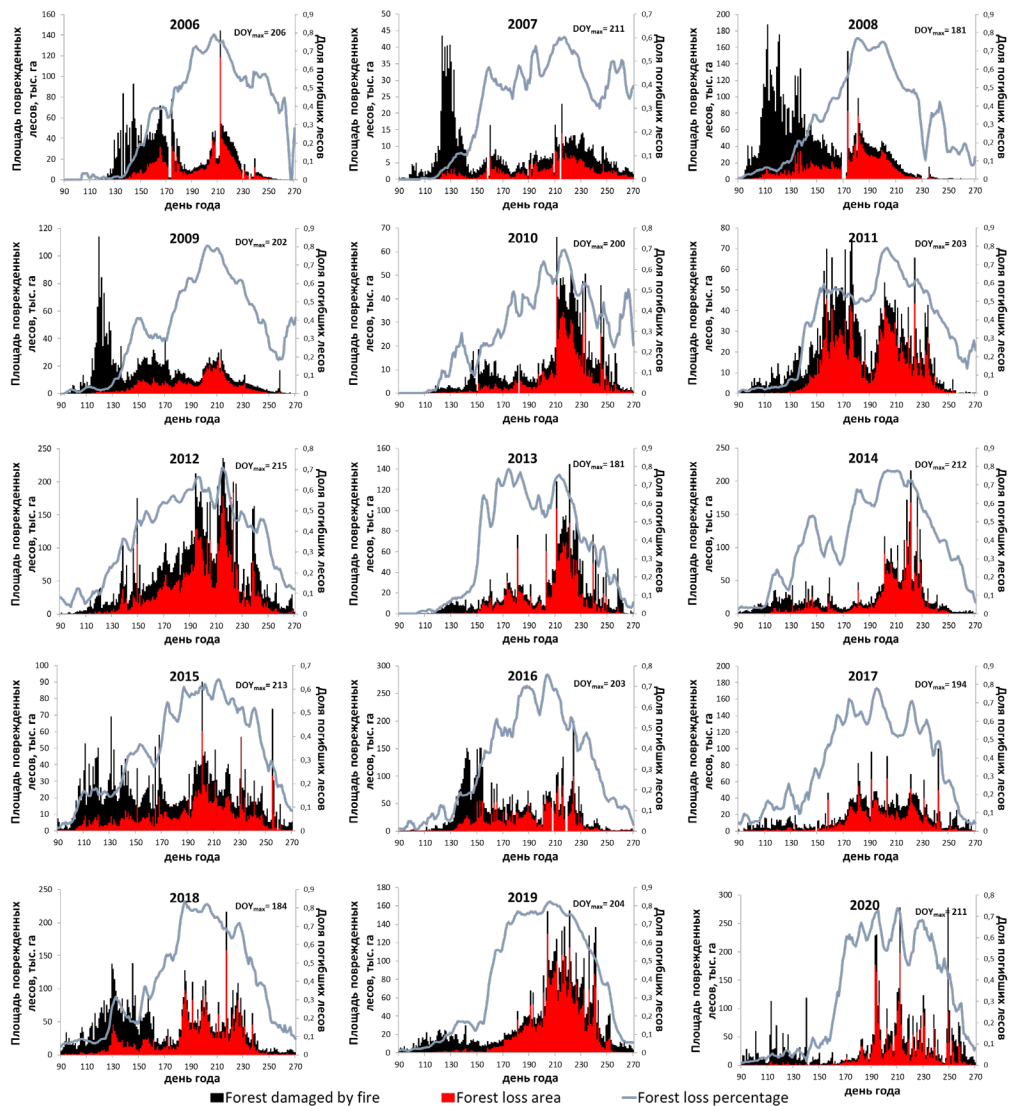
Оценка была выполнена для 11 тыс. пожаров 2011-2016 годов, площадью более 500 га.

В среднем, для экстресс-оценки наблюдается переоценка площади пирогенной гибели лесов на 19%

Вероятностное прогнозирование пирогенной гибели лесов на основе региональных зависимостей



Сезонные особенности гибели лесов России в результате воздействия пожаров



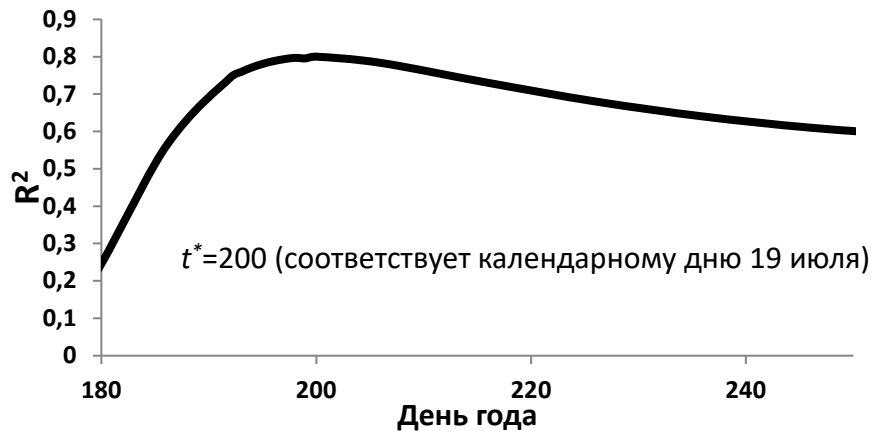
Индекс сезонной летальности пожаров $SFLI_i$ (Seasonal Fire Lethality Index)

$$SFLI_i = BA_i^{-1} \times \sum_t |t - t^*| \times BA_i(t)$$

где $BA_i(t)$ – площадь лесных пожаров i -го года, действовавших

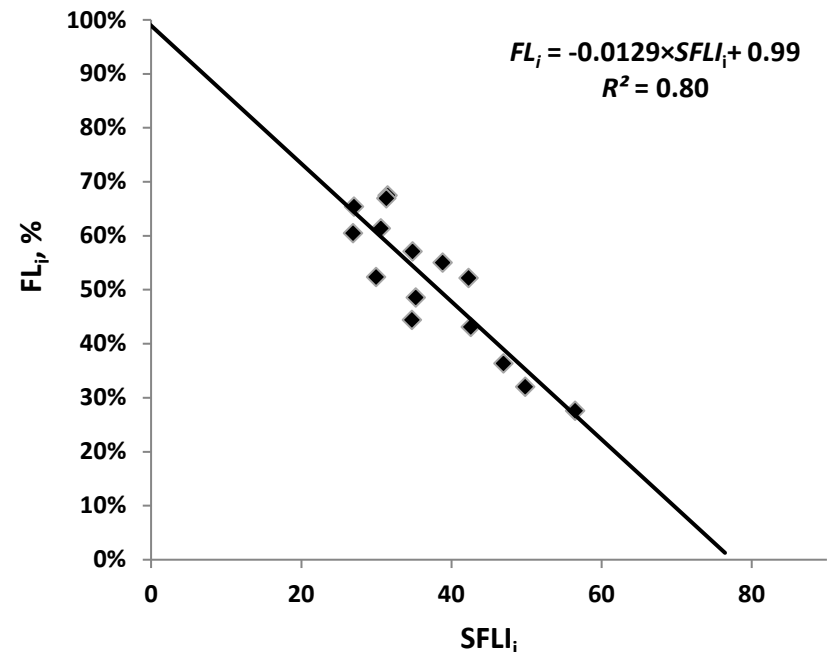
в календарный день t ;

t^* – кульминационный день летальности пожаров, соответствующий календарному дню, при котором достигается максимум критерия корреляции между значениями $SFLI_i$ и FL_i



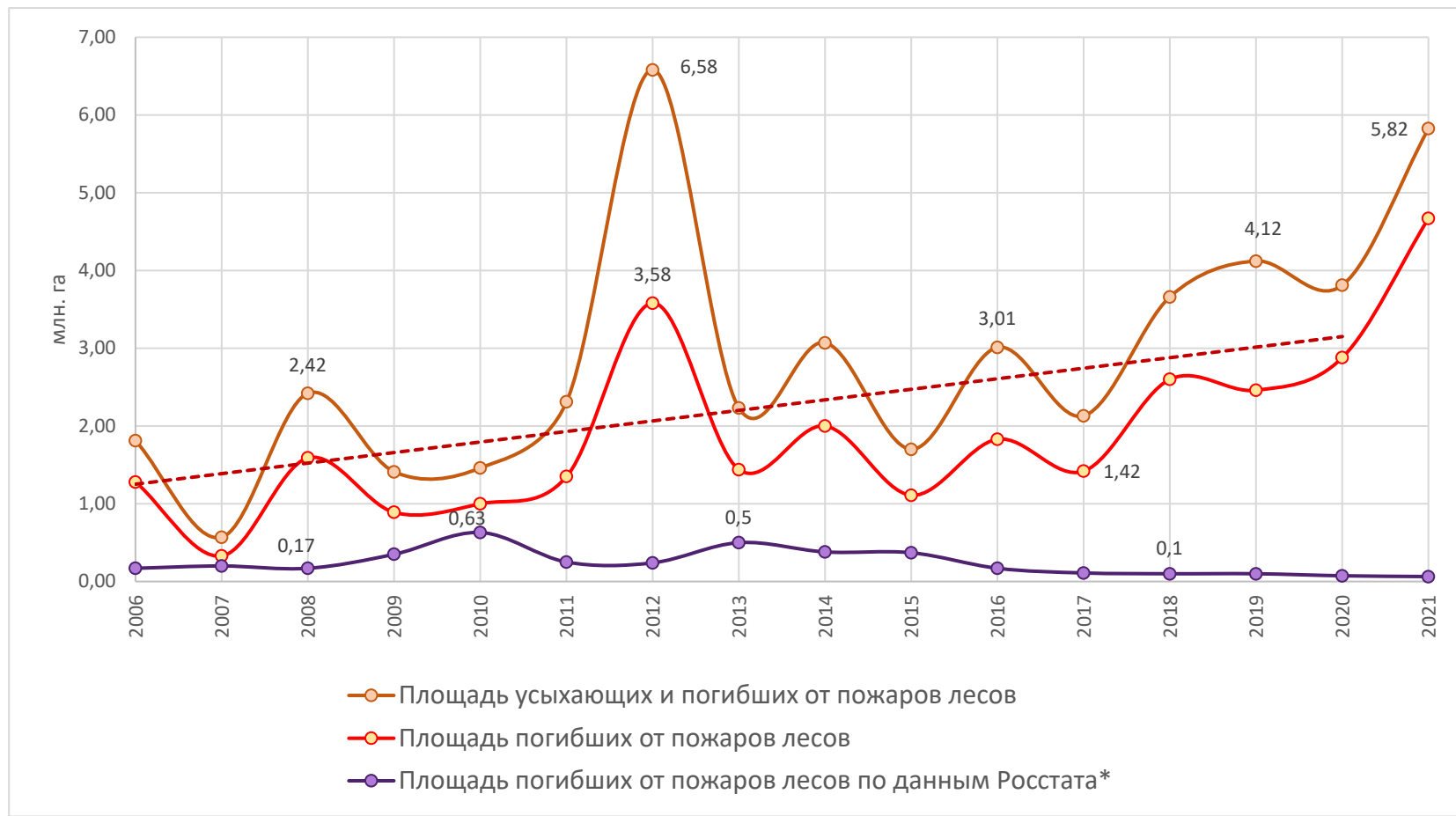
Связь значений летальности лесных пожаров и индекса $SFLI_i$ при выборе различных значений кульминационного дня t^*

(Барталев и др., 2021)



Взаимосвязь летальности и сезонности лесных пожаров

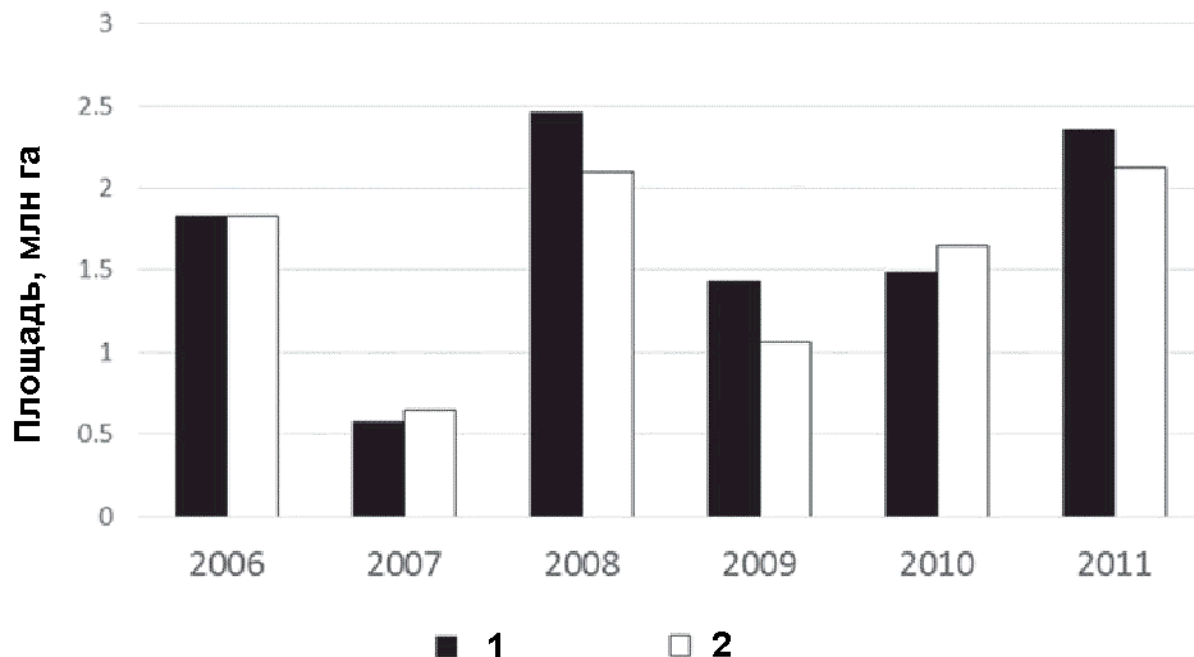
Сравнение полученных оценок с официальными данными



*по данным rosstat.gov.ru

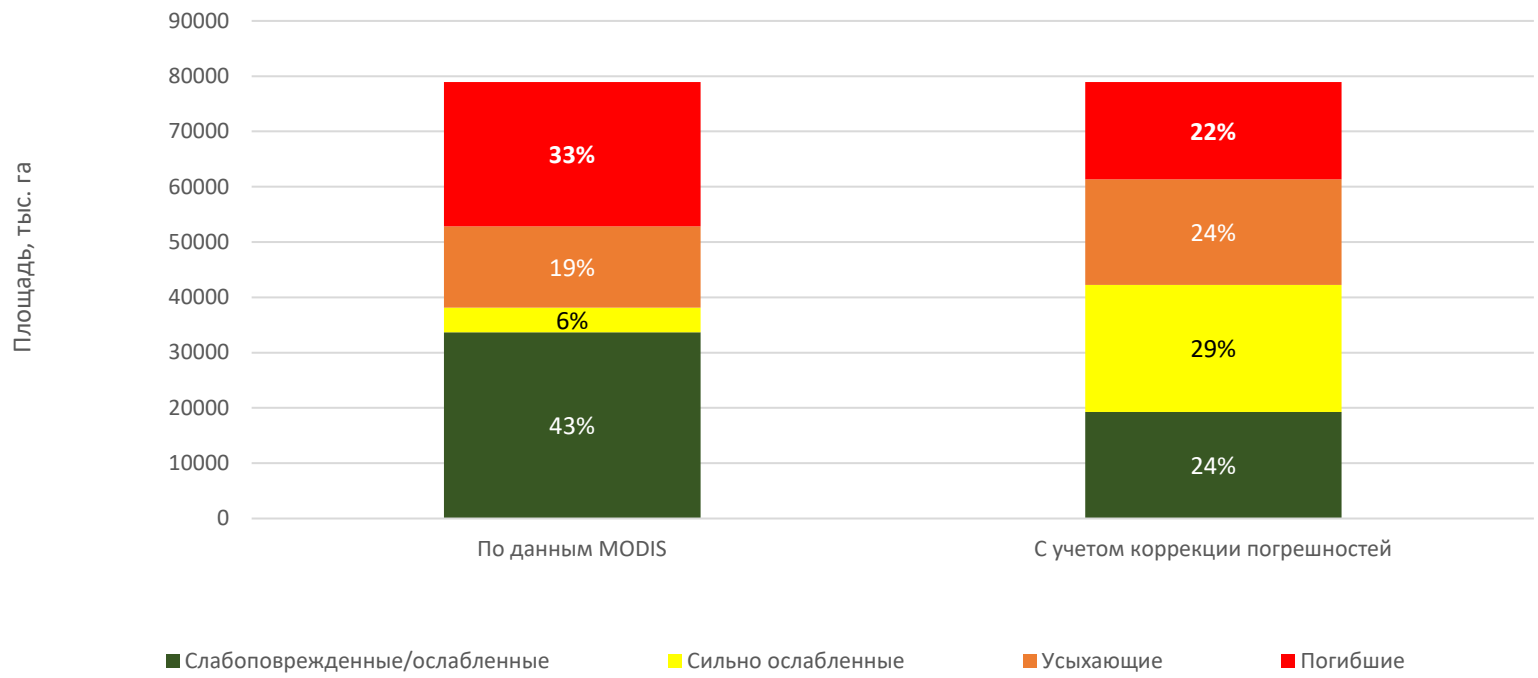
Сравнение с альтернативными оценками

Сравнение с альтернативными оценками пирогаемой гибели лесов на территории России за 2006-2011гг., полученными по данным Landsat Университетом шт. Мэриленд (США), показало отличие интегральных показателей площади, выявленных участков погибших лесов на **7%**.



Оценки усыхающих и погибших насаждений в результате воздействия пожаров полученные на основе представленного метода(1) и оценки сильно измененных лесов по данным Университета шт. Мэриленд(2) (Krylov и др., 2014)

Оценка погрешностей оценки СКС поврежденных пожарами лесов по данным MODIS



Распределения степени повреждения лесов России пожарами за период 2006-2020 годов по данным MODIS с учетом коррекции погрешностей

Сопоставление первоначальных оценок со скорректированными может быть рассмотрено как оценка погрешностей определения площади погибших и поврежденных пожарами лесов, а именно:

- здоровые и ослабленные: переоценка на 42.7%;
- усыхающие: недооценка на 29,6%;
- погибшие: переоценка на 32.5%.

Для объединенного класса погибших и усыхающих лесов погрешность переоценки площади составила **10.1%**.

Работы по массовому картографированию погибших и поврежденных пожарами лесов на территории Якутии с использованием данных высокого пространственного разрешения

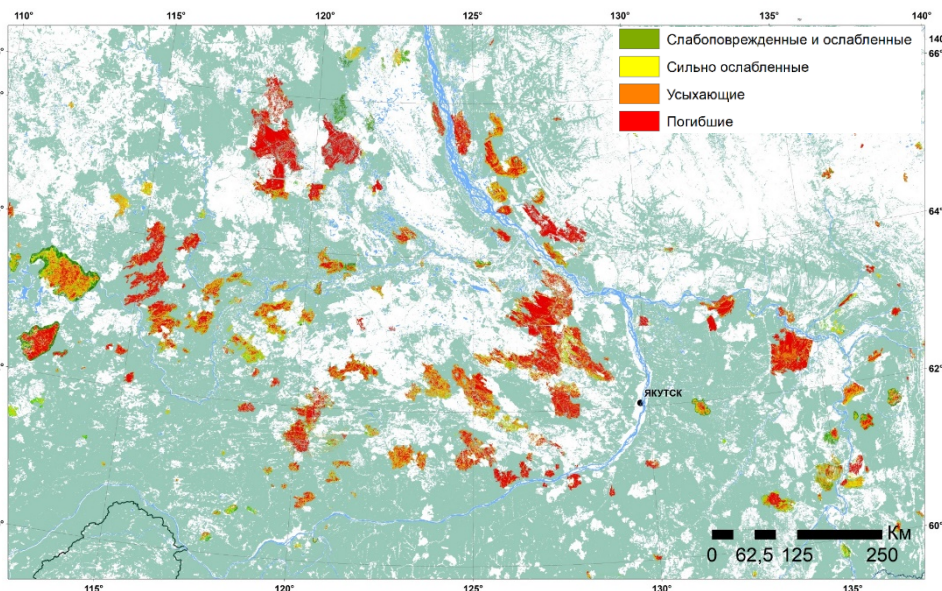
Было выполнено картографирование повреждений лесов пожарами для 260 пожаров, составляющих **93%** пройденных огнем площадей в регионе в 2021 году.

Сравнение оценок по данным MODIS с результатами картографирования по данным высокого разрешения

	Оценка по данным MODIS, млн га	Оценка по данным высокого разрешения, млн га	Расхождение, %
Погибшие	4,08	2,81	31%
Погибшие и усыхающие	4,96	4,27	14%

Сравнение скорректированных оценок по данным MODIS с результатами картографирования по данным высокого разрешения

	Оценка по данным MODIS с коррекцией погрешностей, млн га	Оценка по данным высокого разрешения, млн га	Расхождение, %
Погибшие	2,75	2,81	-2%
Погибшие и усыхающие	3,89	4,27	-10%



Оценка погибших и поврежденных пожарами лесов в Якутии по данным высокого разрешения

Применение данных о поврежденных пожарами лесов по данным MODIS

- Получение информации о последствиях воздействия огня на лесные экосистемы;
- Оценка экологических и экономических последствий;
- Использование в задачах картографирования растительного покрова;
- Использование в задачах, связанных с оценкой эмиссий парниковых газов и баланса углерода.

Исследования выполнены в рамках темы ГЗ " Методические подходы к оценке структурной организации и функционирования лесных экосистем", регистрационный номер НИОКТР 121121600118-8 при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект №19-77-30015). Использовалась инфраструктура хранения и обработки спутниковых данных Центра коллективного пользования "ИКИ-Мониторинг" (Лупян и др., 2015).

Список литературы

1. Барталев С.А., Егоров В.А., Ершов Д.В., Исаев А.С., Лупян Е.А., Плотников Д.Е., Уваров И.А. Спутниковое картографирование растительного покрова России по данным спутнорадометра MODIS // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса, 2011. Т.8. № 4. С.285-302.
2. Барталев С.А., Егоров В.А., Ефремов В.Ю., Лупян Е.А., Стыценко Ф.В., Флитман Е.В. Оценка площади пожаров на основе комплексирования спутниковых данных различного пространственного разрешения MODIS и Landsat-TM/ETM+ // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2012. Т. 9. № 2. С. 9-27.
3. 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.
4. Барталев С.А., Егоров В.А., Крылов А.М., Стыценко Ф.В., Ховратович Т.С. Исследование возможностей оценки состояния поврежденных пожарами лесов по данным многоспектральных спутниковых измерений // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2010. Т. 7. № 3. С. 215-225.
5. Барталев С.А., Стыценко Ф.В. Спутниковая оценка гибели древостоев от пожаров по данным о сезонном распределении пройденной огнем площади // Лесоведение. 2021. № 2. С. 115-122. DOI: 10.31857/S0024114821020029.
6. Барталев С.А., Стыценко Ф.В., Егоров В.А., Лупян Е.А. Спутниковая оценка гибели лесов России от пожаров // Лесоведение, 2015. № 2. С.83-94.
7. Барталев С.А., Стыценко Ф.В., Хвостиков С.А., Лупян Е.А. Методология мониторинга и прогнозирования пирогенной гибели лесов на основе данных спутниковых наблюдений // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2017. Т. 14. № 6. С. 176-193. DOI: 10.21046/2070-7401-2017-14-6-176-193.
8. Егоров, В.А. Мониторинг повреждения растительного покрова Северной Евразии пожарами по данным спутниковых наблюдений: автореф. дис. канд. техн. наук : 25.00.34. / В.А. Егоров; ИКИ РАН, Москва, 2006 - 24с.
9. Лупян Е.А., Прошин А.А., Бурцев М.А., Балашов И.В., Барталев С.А., Ефремов В.Ю., Кашницкий А.В., Мазуров А.А., Матвеев А.М., Суднева О.А., Сычугов И.Г., Толпин В.А., Уваров И.А. Центр коллективного пользования системами архивации, обработки и анализа спутниковых данных ИКИ РАН для решения задач изучения и мониторинга окружающей среды // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2015. Т. 12. № 5. С. 263-284.
10. Лупян Е.А., Стыценко Ф.В., Сенько К.С., Балашов И.В., Мазуров А.А. Оценка площадей пожаров на основе детектирования активного горения с использованием данных шестой коллекции приборов MODIS // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2021. Т. 18. № 4. С. 178-192. DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-4-178-192.
11. Руководство по проектированию, организации и ведению лесопатологического мониторинга. Утверждено приказом Рослесхоза от 29.12.2007№523 // Правовая система Консультант плюс, URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_129394 (дата обращения: 15.08.2020)
12. Сочилова Е. Н., Ершов Д. В. Картографирование и оценка поврежденных пожарами лесови пожарных эмиссий углерода по спутниковым изображениям высокого пространственного разрешения // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. - М., 2007. - Вып. 4, т. 2. - С. 322-331
13. Стыценко Ф.В., Барталев С.А., Егоров В.А., Лупян Е.А. Метод оценки степени повреждения лесов пожарами на основе спутниковых данных MODIS // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса, 2013. Т.10. № 1. С.254-266.
14. Allen, J.L.; Sorbel, B. Assessing the differenced Normalized Burn Ratio's ability to map burn severity in the boreal forest and tundra ecosystems of Alaska's national parks. *Int. J. Wildland Fire* 2008, 17, 463–475.
15. De Santis A., Chuvieco E., Vaughan P.J., Short-term assessment of burn severity using the inversion of PROSPECT and GeoSail models // *Remote Sensing of Environment*, Volume 113, Issue 1, 15 January 2009, Pages 126–136, ISSN 0034-4257
16. Gao B., NDWI - A normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space // *Remote Sensing of Environment*, 58, 1996, pp. 257-266.
17. Hoy, E.E.; French, N.H.; Turetsky, M.R.; Trigg, S.N.; Kasischke, E.S. Evaluating the potential of Landsat TM/ETM+ imagery for assessing fire severity in Alaskan black spruce forests. *Int. J. Wildland Fire* 2008, 17, 500–514.
18. J. Epting, D. Verbyla, B. Sorbel Evaluation of remotely sensed indices for assessing burn severity in interior Alaska using Landsat TM and ETM+ *Remote Sensing of Environment*, 96 (3–4) (2005), p. 328 *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 71 (11) (2005), pp. 1311-1320
19. K.C. Brewer, J.C. Winne, R.L. Redmond, D.W. Opitz, M.V. Mangrich Classifying and mapping wildfire severity: A comparison of methods
20. Key, C., and Benson, N. (1999). The Normalized Burned Ratio, a Landsat TM radiometric index of burn severity incorporating multi-temporal differencing // U.S. Geological Survey.
21. Krylov A., McCarty J. L., Potapov P., Loboda T., Tyukavina A., Turubanova S., Hansen M.C. (2014) Remote sensing estimates of stand-replacement fires in Russia, 2002-2011. *Environmental Research Letters*, 2014, vol. 9, № 10, pp 1-8.
22. Miller J.D., Thode A.E. Quantifying burn severity in a heterogeneous landscape with a relative version of the delta Normalized Burn Ratio (dNBR) // *Remote Sensing of Environment* 109, 2007, pp 66–80.
23. Miller, J.D., Knapp, E.E., Key, C.H., Skinner, C.N., Isbell, C.J., Creasy, R.M., & Sherlock, J.W. (2009). Calibration and validation of the relative differenced 99 Normalized Burn Ratio (RdNBR) to three measures of fire severity in the Sierra Nevada and Klamath Mountains, California, USA. *Remote Sensing of Environment*. 113, 645;656
24. Rouse J.W., Haas R.H., Schell J.A., Deering D.W. Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS // *Third ERTS Symposium*, NASA SP-351 I, 1973, P. 309-317.
25. Thode, A.E. (2005). Quantifying the Fire Regime Attributes of Severity and Spatial Complexity Using Field and Imagery Data. PhD Dissertation, University of California, Davis, CA.

Благодарю за внимание!

Mail to: fedor@d902.iki.rssi.ru