

## Анализ показателей температурных аномалий для выявления торфяных пожаров

М. А. Медведева<sup>1</sup>, В. Ю. Иткин<sup>1,2</sup>, А. А. Сири́н<sup>1</sup>

<sup>1</sup> *Институт лесоведения РАН, с. Успенское, 143030, Московская обл., Россия  
E-mail: evezza@yandex.ru*

<sup>2</sup> *Российский государственный университет нефти и газа (национальный исследовательский университет) имени И. М. Губкина, Москва, 119991, Россия  
E-mail: itkin.v@gubkin.ru*

Торфяные почвенные пожары отличаются от других поверхностных природных пожаров длительностью, выбросом опасных для человека продуктов горения, потерей углерода и другими воздействиями на окружающую среду. Пожары на торфяниках можно идентифицировать путём наложения данных о пожарах, полученных на основе тепловых аномалий спектрорадиометра среднего разрешения MODIS (*англ.* Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) спутников Terra/Aqua, на существующие карты распространения торфяников. Однако не все лесные пожары, возникающие на торфяниках, переходят в подземные (торфяные) пожары. На примере крупных пожаров 2010 г. в центре европейской части России проанализирована возможность использования показателей пожарной активности (мощность пожарного излучения — FRP (*англ.* Fire Radiative Power), температура, продолжительность и др.), полученных по данным MODIS, для выявления почвенных (торфяных) пожаров и их отделения от поверхностных пожаров. Предложен и апробирован специальный индекс торфяного пожара, основанный на использовании нескольких параметров (максимальные значения FRP и температуры горения, продолжительность горения и площадь возгорания), показавший точность обнаружения торфяных пожаров по количеству до 95 %. Полученные результаты требуют проверки на других участках, но дают убедительные доказательства того, что дистанционные данные можно использовать для обнаружения торфяных пожаров.

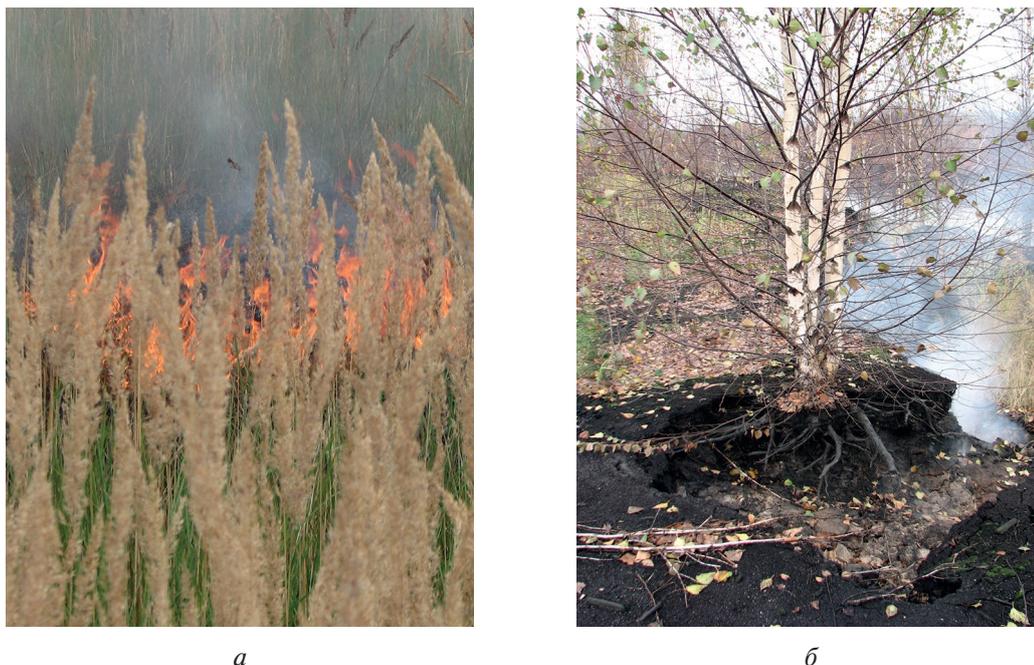
**Ключевые слова:** дистанционное зондирование, торфяники, температурные аномалии, растительный покров, Terra/Aqua MODIS, индекс торфяного пожара

Одобрена к печати: 31.10.2023

DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-6-92-116

### Введение

Деятельность человека и изменение климата негативно сказываются на частоте возникновения лесных пожаров в мире (Jia et al., 2019). При этом торфяные пожары особенно влияют на планету и климат, поскольку они затрагивают наиболее насыщенные углеродом наземные экосистемы: в глобальном масштабе количество углерода, запасённого в торфах, превышает количество углерода, запасённого в растительности (Assessment et al., 2008). Торф при тлеющем горении может гореть очень долго, даже под дождём и снежным покровом (Hu et al., 2018; Rein, 2013; Schulte et al., 2019; Turetsky et al., 2015), что ведёт к образованию парниковых газов (ПГ) (2013 Supplement, 2014). При этом выделяется значительный объём древнего углерода, составляющий примерно 15 % антропогенных выбросов (Huang, Rein, 2017; Poulter et al., 2006). При сгорании торф, который имеет более низкую температуру горения по сравнению с биомассой, выделяет больше сажи — чёрного углерода, способного далеко распространяться, а его дымовые соединения негативно влияют на здоровье человека (Hu et al., 2018; Marlier et al., 2019). Во время катастрофических пожаров в центре Европейской России летом 2010 г. продукты сгорания торфа нанесли населению непоправимый ущерб (Сири́н и др., 2020; Safronov et al., 2015), когда очень сильный смог (Kononov et al., 2011) вместе с особенно высокой температурой воздуха (Barrigopedro et al., 2011) существенно увеличили смертность (Ревич и др., 2015).



а

б

Рис. 1. Наземный (травяной) пожар на торфянике (а) и подземный (торфяной) пожар (б) на торфянике Тасинский Бор, Национальный парк Мещера, Владимирская обл. Фото Анны Возбранной

Во всём мире там, где есть торфяники, неизбежно возникают торфяные пожары (Hu et al., 2018; Page et al., 2002, 2011; Rossi et al., 2016; Usup, Hayasaka, 2023). В России их можно ожидать в полосе от тундры до степи, но особенно часто — в бореальной зоне (Minayeva et al., 2013). Очень большая часть страны покрыта торфом. Если брать толщину слоя торфа  $\geq 30$  см, то такие участки составят 139 млн га, а для толщины слоя торфа  $< 30$  см — 230 млн га мелкозалегающих торфяников, что вместе составляет 21 % территории страны (Вомперский и др., 1994). А если рассматривать только европейскую часть России, то площадь торфяников составляет 17 % (Tanneberger et al., 2017). 38 % торфяников и 47 % мелкозалегающих торфяников России покрыты редколесной или лесной растительностью (Вомперский и др., 2011). Это повышает вероятность заглужения в почву пожара, который затронет корни деревьев (рис. 1), переходя в подземный (торфяной) пожар.

Уровень грунтовых вод влияет на степень заглужения пожара и количество потерь почвенного углерода (Глухова, Сирин, 2018; Sirin et al., 2021). Благодаря такой связи низкий уровень вод усугубляет последствия изменения климата (Turetsky et al., 2015). Засухи приводят к возникновению пожаров и на естественных болотах, но особенно пожароопасными становятся осушенные торфяники (Joosten et al., 2016), а исключительно опасными — заброшенные и оставленные без должного контроля (Сирин и др., 2011).

Пожары относят к торфяным исходя из характеристик горения, влияния на окружающую среду и ряда других признаков. Обнаружение торфяных пожаров и их отделение от других пожаров важно для решения ряда задач, включая оценку потерь углерода и выбросов парниковых газов. Опубликованы прогнозы, согласно которым осушенные торфяники и торфяные пожары могут стать ключевой проблемой в части сокращения выбросов парниковых газов в рамках достижения задач Парижского соглашения по климату (Leifeld et al., 2019; Loisel et al., 2021). В руководящих принципах инвентаризации парниковых газов Межправительственной группы экспертов по изменению климата (МГЭИК) (2019 Refinement..., 2019; Blain et al., 2006) рассматриваются методологии такой оценки только при сгорании биомассы, а дополнение МГЭИК по водно-болотным угодьям 2013 г. (2013 Supplement..., 2014) также включает оценку выбросов парниковых газов в результате сгорания органических почв. Однако в методологии существуют определённые пробелы, обусловленные в том числе сложностью обнаружения именно торфяных (почвенных) пожаров.

В последнее время опубликованы работы, посвящённые анализу специфики возникновения и протекания торфяных пожаров (Саhуono et al., 2022; Prasetyo et al., 2022; Rein, Huang, 2021), теории и экспериментальному исследованию тлеющего горения торфа (Usup, Hayasaka, 2023; Yuan et al., 2021).

Всё чаще в последнее время для выявления торфяных пожаров применяют беспилотные летательные аппараты (БПЛА) (Burke et al., 2019), тестируют использование бортового лидара для определения горения/убыли торфа (Nelson et al., 2022), но их использование является локальным. При изучении обширных и труднодоступных территорий картографирование гарей от торфяных и лесоторфяных пожаров возможно только на основе анализа дистанционных спутниковых данных.

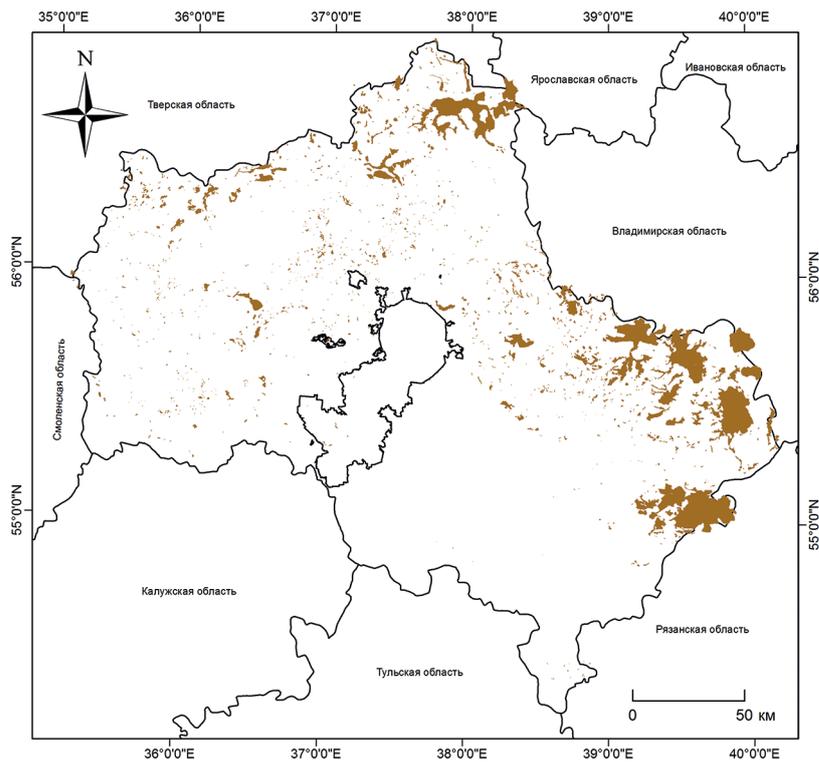
Ранее мы предприняли попытку определить различия лесных и торфяных пожаров путём анализа последствий обширных лесных и торфяных пожаров в центре европейской части России в 2010 г. Нам удалось выявить параметры, отличающие торфяные пожары от других природных пожаров (Сирин и др., 2022; Sirin, Medvedeva, 2022). В данной работе проведена оценка значимости этих параметров для обнаружения торфяных пожаров и предложен базирующийся на них индекс торфяного пожара (*англ.* Peat Fire Index — PFI), применимый для этих целей.

### Объект исследования

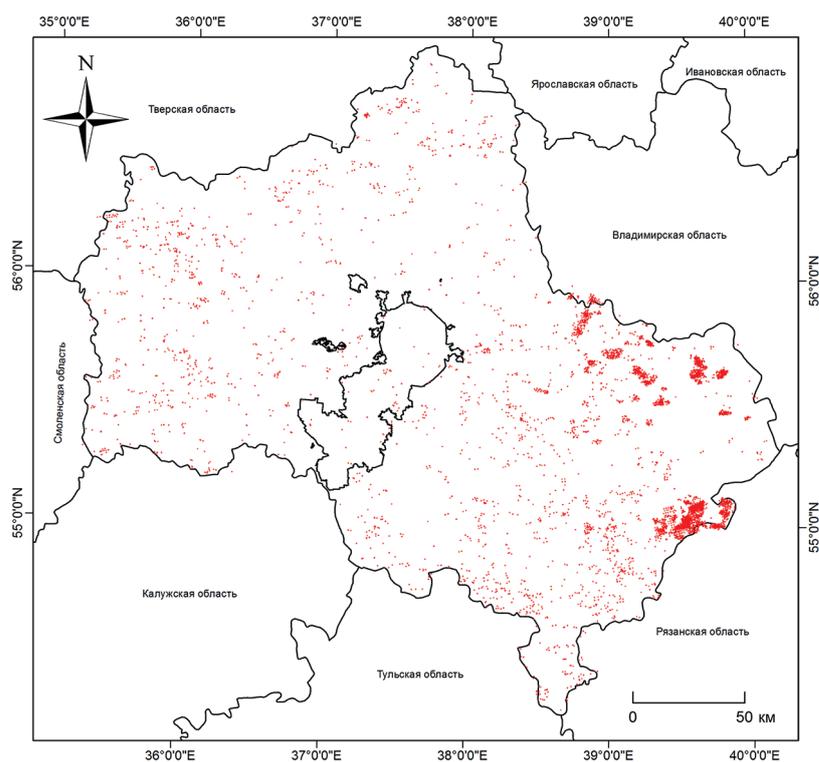
В качестве объекта анализа были взяты пожары Московской обл. 2010 г. (*рис. 2*, см. с. 95). По своим масштабам данные пожары стали одними из самых выдающихся за последние десятилетия, если рассматривать бореальную зону: площадь анализируемой области равняется 44 329 км<sup>2</sup>, а вместе с Москвой — 46 890 км<sup>2</sup>. Около 6 % данной территории (свыше 2500 км<sup>2</sup>) занято торфяниками и осушенными торфяниками, которые в основном располагаются в восточной области (Сирин и др., 2014). Причём здесь находятся наибольшие в европейской части России поля добычи фрезерного торфа, которые наряду с неиспользуемыми осушенными сельскохозяйственными угодьями являются первоочередными зонами риска возникновения торфяных пожаров. В 2010–2013 гг. в целях профилактики подобных пожаров в Московской обл. был реализован крупнейший в Северном полушарии проект повторного обводнения торфяников общей площадью 730 км<sup>2</sup> (77 объектов). Эффективность данной программы была однозначно подтверждена последующим мониторингом по спутниковым данным с наземной проверкой, при этом отмечен её вклад как в обеспечение противопожарной защиты (Сирин и др., 2020), так и в деятельность по сокращению выбросов ПГ (Сирин и др., 2021).

### Исходные данные

Для соотнесения областей прохождения лесных пожаров и мест залегания торфяников использовались данные ГИС (геоинформационные системы) по торфяникам Московской обл. (см. *рис. 2а*) (Сирин и др., 2014). При формировании указанных ГИС были собраны воедино отраслевые и научные данные, в том числе результаты инвентаризации торфяных залежей и лесов, геоботанические, почвенные, топографические карты, также задействованы другие источники первичной информации. Для геопривязки полигонов торфяников было решено применить методику, апробированную в рамках ГИС «Торфяники России» для других регионов страны (Вомперский и др., 2011; Sirin et al., 2017). Использовались специально полученные мультиспектральные снимки со спутника Spot-5, которые благодаря размеру пикселя в 10 м позволяют выявлять объекты с площадью от 0,5 га (Сирин и др., 2014). В результате зарегистрированы торфяники общей площадью 254 000 га, при этом подавляющее их большинство имело площадь менее 100 га, около половины — от 1 до 10 га. Торфяники площадью более 1000 га (всего 35) занимают более 75 % торфяников региона, а шесть крупнейших (площадь более 10 000 га) — 48 %.



*a*



*b*

Рис. 2. Торфяники (а) (Сирин и др., 2014) и температурные аномалии (б) в 2010 г. в Московской обл.

Пожары на торфяниках выявлялись путём пересечения областей лесных пожаров с границами торфяников (см. рис. 2а) (Сирин и др., 2014). Для этого применялись спутниковые данные низкого пространственного разрешения (1 км) о температурных аномалиях (см.

рис. 2б) Collection 6 (МС6) Terra/Aqua MODIS, предоставленные Центром коллективного пользования (ЦКП) «ИКИ-Мониторинг» Института космических исследований РАН (ИКИ РАН) (<http://ckp.geosmis.ru/>) (Лупян и др., 2019). В работе использована дополнительная информация о пожарах, полученная путём объединения нескольких горящих полигонов в разное время при условии, что они перекрывают друг друга или расположены на расстоянии менее 1 км, а по времени различаются не более чем на пять суток. В свою очередь, горящие полигоны для каждого изображения Terra/Aqua MODIS были получены из нескольких точек температурных аномалий, если они перекрывались или между ними было не более 0,3 км (Барталев и др., 2012).

При оценке площадей, пройденных лесными пожарами, на основе температурных аномалий необходимо было выполнить коррекцию геометрических площадей пожаров. Это связано в первую очередь с тем, что используемые для детектирования данные имеют достаточно низкое пространственное разрешение, что может приводить к завышению оценок площадей, пройденных огнём. Площади пожаров на базе температурных аномалий МС6 проходили коррекцию на основе анализа выборки из 5474 пожаров, детектированных на территории России в период 2009–2020 гг. Для указанной выборки были получены данные о горях (площадах, пройденных лесными пожарами), основанные на использовании изображений высокого пространственного разрешения (10–30 м) Landsat и Sentinel. Общая площадь картографированных гарей составила 9,06 млн га. На основе сравнения информации о площадях гарей с данными о геометрических площадях пожаров была получена формула коррекции, применение которой позволило получить новые площади пожаров с точностью около 4 % (Лупян и др., 2021).

Для всех анализируемых 999 пожаров Московской обл. общей площадью 253,3 тыс. га за весь пожарный сезон были получены на основе Terra/Aqua MODIS следующие показатели: минимальные, максимальные и средние радиационная мощность пожара (*англ.* Fire Radiative Power — FRP) (*Min\_frp*, *Max\_frp*, *Avg\_frp*) (Freeborn et al., 2014) и температура горения по продуктам MOD14/MYD14 (*Min\_temp*, *Max\_temp*, *Avg\_temp*), общая площадь пожара (*Area*), занятая лесом площадь пожара (*Area\_forest*), а также длительность горения (*Duration*) (Лупян и др., 2020). Для расчёта значений FRP, хранящихся в Collection 6 Terra/Aqua MODIS, использовано уравнение, первоначально сформулированное авторами работы (Kaufman et al., 1998), с поправками, приведёнными в публикации (Giglio et al., 2003).

Для подтверждения точности обнаружения гарей в 2017 г. была проведена наземная проверка. При этом было случайным образом выбрано 598 точек на 151 торфянике. Использовались участки суммарной площадью 243 км<sup>2</sup>. Было пройдено около 2000 км автомобильных маршрутов и 25 км пеших. Для выявления следов торфяных пожаров на участках сделаны неглубокие земляные прикопки и проведена фотосъёмка местности.

Наземными измерениями исследовались не все детектированные по спутниковым данным пожары, а только часть из них, из чего следует, что часть «пожаров на торфяниках» не имели наземной информации подтверждения или опровержения факта возгорания торфа. Пожары на торфяниках без наземного обследования составили 189 шт. (26,7 тыс. га) торфяные (почвенные) пожары — 72 шт. (157,6 тыс. га) и другие природные пожары — 738 шт. (69,0 тыс. га).

## Предварительная обработка данных

Для определения пожаров на торфяниках области, занятые болотами и торфяниками, пересекались с контурами природных пожаров, полученными на основе дистанционных данных MODIS низкого пространственного разрешения (1 км) о тепловых аномалиях, снабжёнными показателями пожарной активности. Данные предоставлены ЦКП «ИКИ-Мониторинг» ИКИ РАН (<http://ckp.geosmis.ru/>) (Лупян и др., 2019).

Для анализа отличий торфяных пожаров от прочих были использованы данные за летний период и начало осени (с 01.06.2010 по 01.10.2010). Весной проводят пал травы — выжигание сухой прошлогодней травы. Он может представлять собой контролируемый процесс с целью

предотвращения пожаров, однако часто пал возникает случайно или выходит из-под контроля — прошлогодняя растительность быстро достигает высокой горючести в сухой, особенно ветреный, весенний период. В то же время весной высок уровень грунтовых вод и влажности почвы (особенно на болотах), что значительно уменьшает пожароопасность торфяников и препятствует заглоблению огня.

По спутниковым и наземным данным было определено, что 54 пожара являются торфяными, а по спутниковым данным установлено, что 80 пожаров произошли вне торфяников и являются поверхностными; всего 134 измерения. Летом 36 пожаров оказались на территории торфяников, однако наземных данных о том, является ли пожар поверхностным или почвенным, нет.

С помощью MODIS для каждого пожара измерялись следующие показатели: *Area*, *Area\_forest*, *Min\_frp*, *Max\_frp*, *Avg\_frp*, *Min\_temp*, *Max\_temp*, *Avg\_temp*, *Duration*. Эти показатели имеют разные масштабы и распределены очень неравномерно: малые значения встречаются часто, большие — редко. Для улучшения качества модели данные (кроме *Area\_forest*) были предварительно обработаны: сдвинуты в положительную область, прологарифмированы, центрированы и нормированы. Переменная *Area\_forest* (площадь леса) была преобразована в  $Forest = Area\_forest/Area$ , т. е. в долю площади, занятой лесом, а затем нормирована и центрирована.

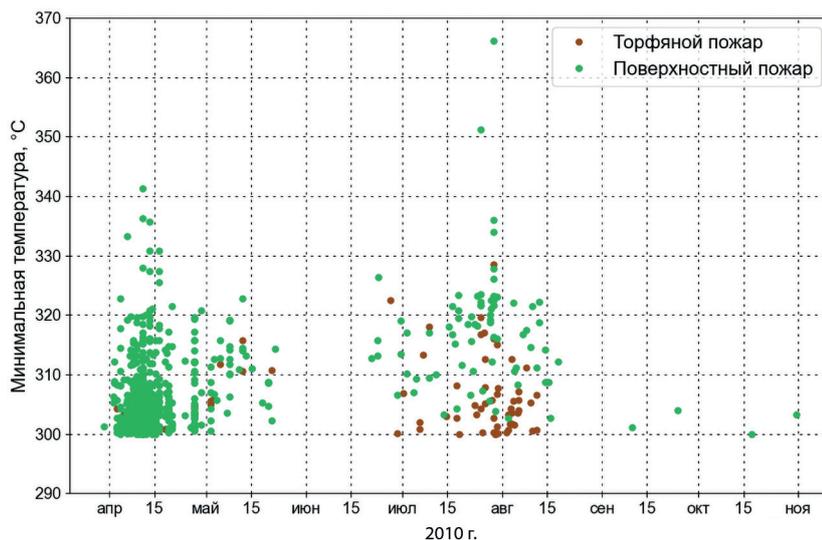
На *рис. 3* (см. с. 98–100) представлено распределение исследуемых показателей пожарной активности за пожарный сезон 2010 г. Наиболее значительными пожары были в июле — августе, и именно они представляют особый интерес для изучения. Далее для анализа использовались пожары на торфяниках с подтверждением факта горения торфа по наземным данным и пожары на не торфяниках.

Было проведено сравнение характеристик почвенных (см. *рис. 3*, коричневые точки) и поверхностных (см. *рис. 3*, зелёные точки) пожаров. На распределениях площади (см. *рис. 3б*), длительности (см. *рис. 3д*), максимальной радиационной мощности (см. *рис. 3ж*) и максимальной температуры (см. *рис. 3и*) явно заметны группировки торфяных показателей с более высокими значениями, чем у не торфяных пожаров. Такая визуализация данных дала возможность предположить разделение поверхностных (травяных) пожаров на торфяниках и перешедших в категорию собственно торфяных пожаров, захвативших торфяные почвы, на основе пороговых значений исследуемых показателей пожарной активности. Такой подход призван выявить наличие факта торфяных (почвенных) пожаров на рассматриваемой территории по данным о тепловых аномалиях Terra/Aqua MODIS. Эта информация позволила бы получить сигнал об особом виде природных пожаров, который характеризуется выбросом наиболее опасных для здоровья человека веществ. А также о том, что степень последствий для растительного покрова, особенно древесного, будет высокой, а потери углерода и эмиссия парниковых газов в атмосферу будут связаны с горением не только биомассы, но и торфяной почвы.

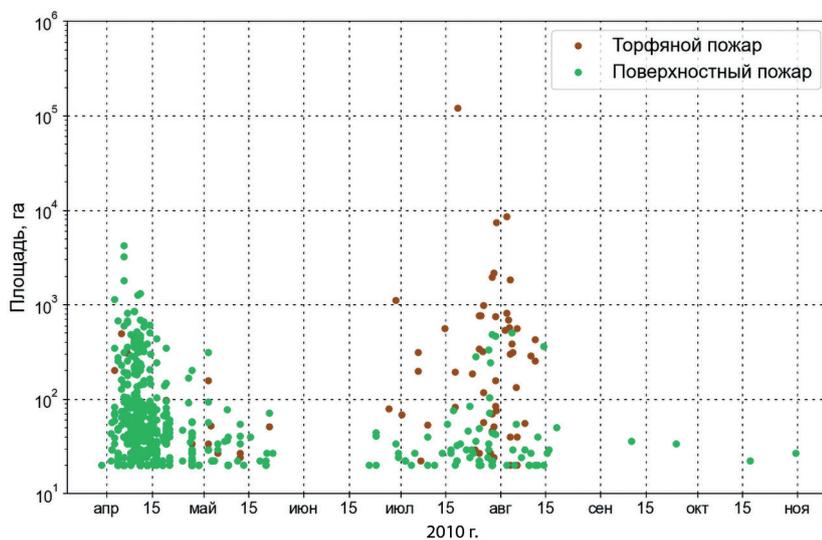
## Логистическая модель индекса торфяного пожара

В представляемой работе исследована возможность предсказать, является ли пожар на торфянике почвенным торфяным пожаром. Построена модель индекса торфяного пожара PFI — величины, которая показывает степень уверенности в том, что данный пожар — торфяной. Эта величина принимает значения от 0 до 1: 0 — поверхностный пожар, 1 — почвенный торфяной пожар; значения в промежутке означают, что пожар может быть как поверхностным, так и почвенным.

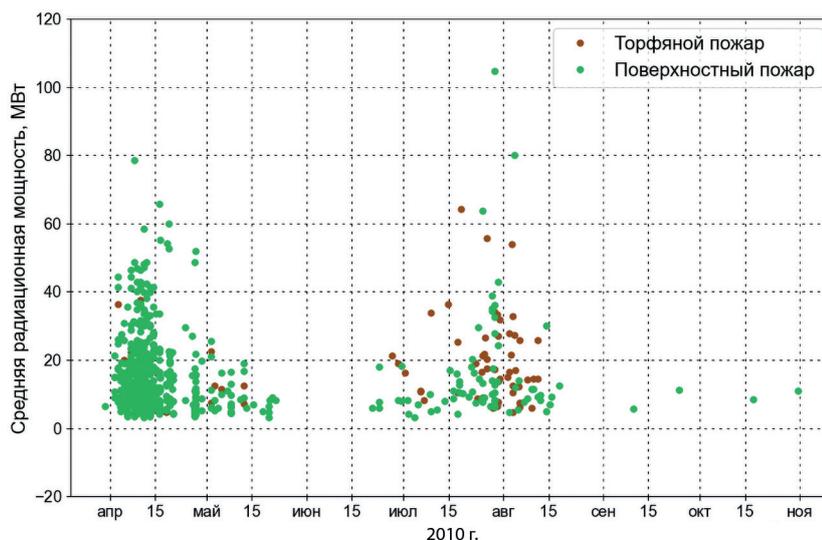
Предлагаемый индекс принимает значения на отрезке  $[0, 1]$ , поэтому модель должна содержать преобразование, переводящее любое число в этот диапазон. Этому требованию отвечают *логит*- и *пробит*-модели (Суслов и др., 2005). В работе рассматривается только логит-модель (называемая также логистической регрессией), поскольку пробит-модель приводит к аналогичным результатам.



а

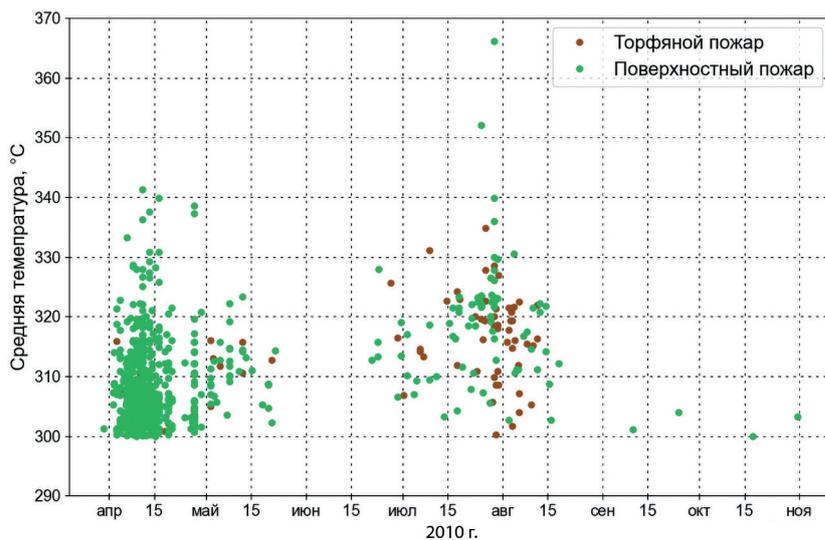


б

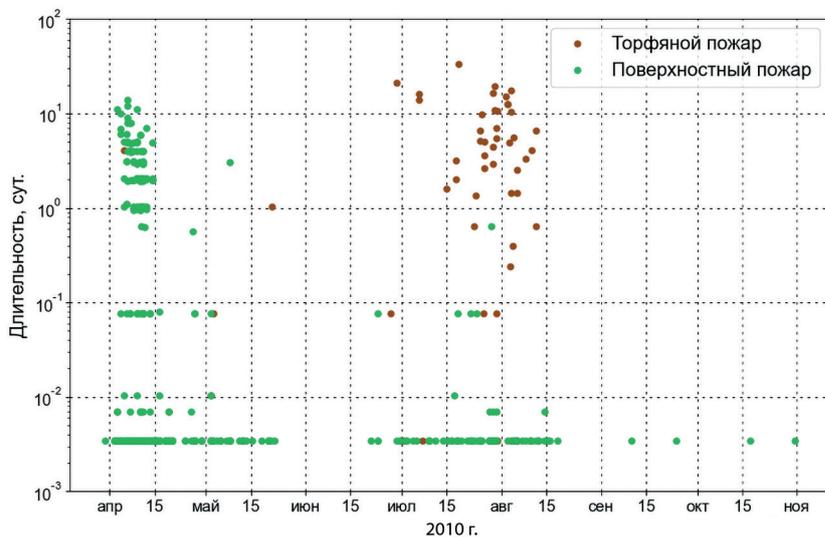


в

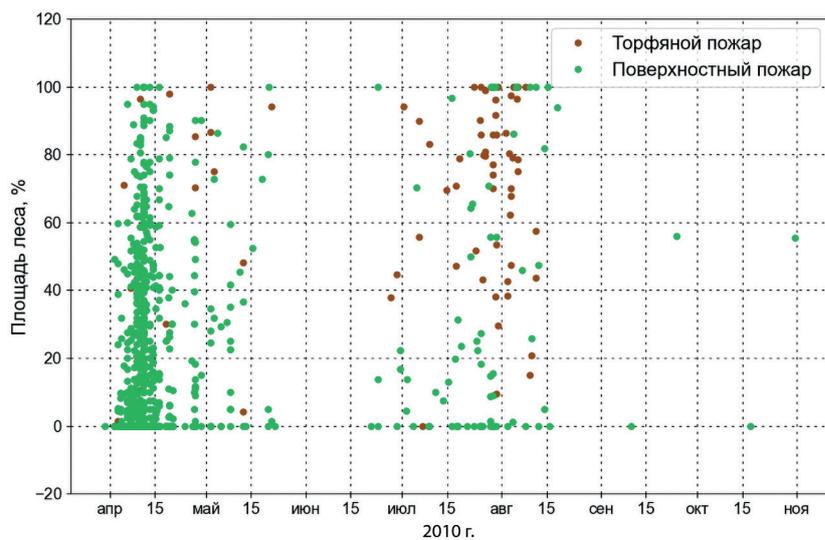
Рис. 3а–в. Показатели пожаров 2010 г. на торфяниках и на не торфяниках в Московской обл.: а — минимальная температура, °С; б — площадь, га; в — среднее FRP, МВт (продолжение см. на с. 99)



z



d



e

Рис. 3г–е. Показатели пожаров 2010 г. на торфяниках и на не торфяниках в Московской обл.: z — средняя температура, °С; d — длительность, дни; e — занятая лесом площадь, % (окончание см. на с. 100)

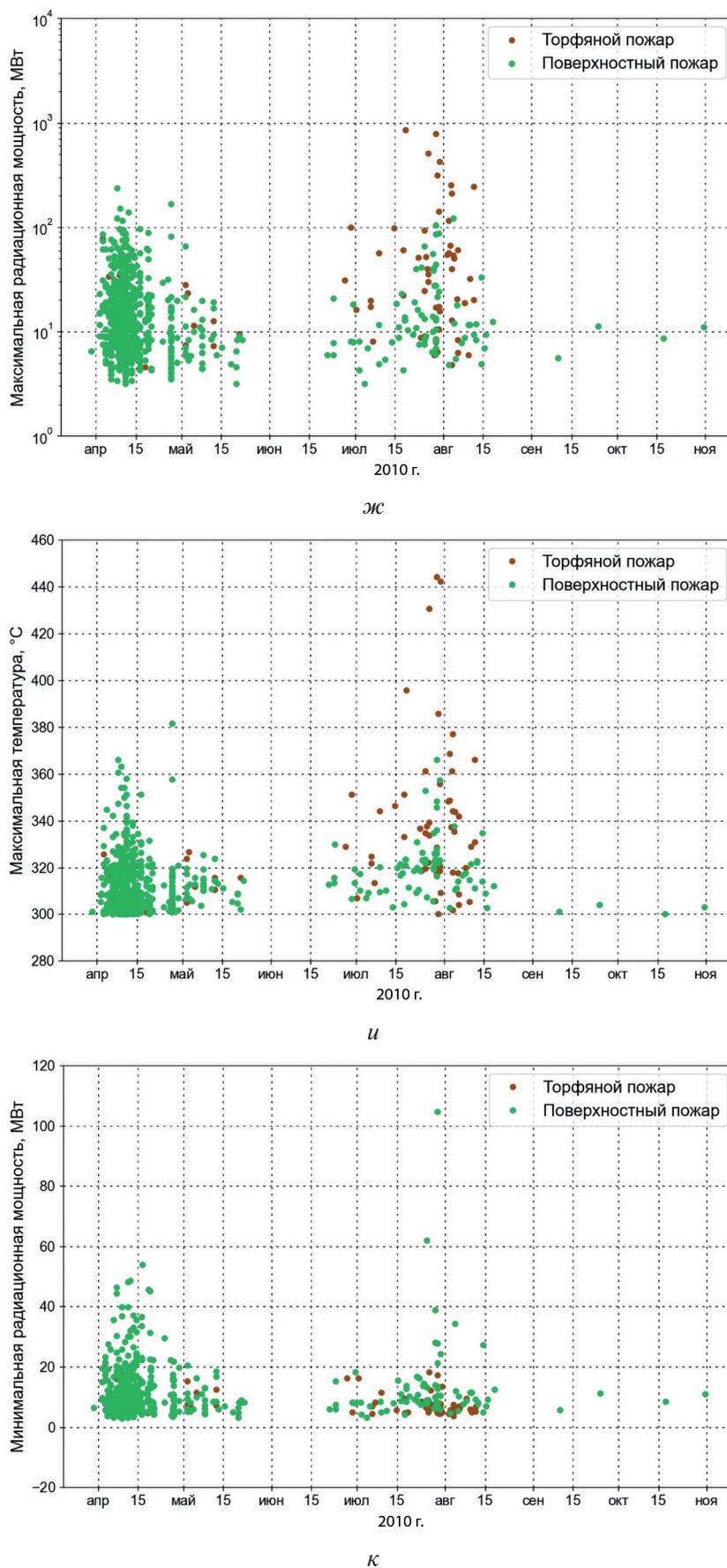


Рис. 3ж–к. Показатели пожаров 2010 г. на торфяниках и на не торфяниках в Московской обл.: ж — максимальное FRP, МВт; и — максимальная температура, °C; к — минимальное FRP, МВт

Если обозначить эти показатели через переменные  $x_i$ , а индекс торфяного пожара через  $T$ , то зависимость будет иметь следующий вид:

$$T(x_1, \dots, x_n) = (1 + e^{-\sum b_i x_i})^{-1},$$

где  $b_i$  — коэффициенты, вычисленные по имеющимся данным методом максимального правдоподобия (Суслов и др., 2005).

Предварительное исследование показало, что большинство измеряемых параметров пожара практически не влияют на возможность идентифицировать пожар как торфяной. Влияние переменных можно оценить с помощью критериев Стьюдента и Фишера (Суслов и др., 2005).

Гипотеза о незначимости переменной может быть ошибочно принята, если на самом деле коэффициент ненулевой, но стандартная ошибка слишком велика, т.е. коэффициенты вычислены с низкой точностью. То есть переменная влияет на индекс, но мы не можем корректно определить это влияние из-за больших случайных помех или недостаточного количества данных (чем больше измерений, тем выше точность). Мы даже не можем определить характер влияния: приведёт ли увеличение данной переменной к росту индекса (коэффициент положительный) или к его снижению (коэффициент отрицательный). Поэтому включение в модель незначимых переменных может привести к серьёзным ошибкам при прогнозировании.

## Пороговые значения для идентификации пожаров

Чтобы идентифицировать пожар, характер которого неизвестен, но имеются спутниковые измерения его характеристик, определим левое и правое пороговые значения показателя. Пожары, имеющие значения показателя менее левого порога, будем считать поверхностными; пожары, имеющие значения показателя более правого порога, будем считать почвенными, а пожары, имеющие промежуточные значения показателя, останутся неопределёнными.

Зададим малые (например, 1 %) вероятности того, что поверхностный пожар будет иметь значение показателя больше правого порога и почвенный пожар будет иметь значение показателя меньше левого порога. Тогда правый порог можно вычислить как 1%-й квантиль распределения показателя пожара для поверхностных пожаров, т.е. лишь 1 % поверхностных пожаров может иметь значения показателя больше правого порога. Аналогично левый порог можно найти как 1%-й квантиль распределения показателя пожара для почвенных пожаров, т.е. лишь 1 % почвенных пожаров может иметь значения показателя пожара меньше левого порога.

## Результаты и обсуждение

### Использование отдельных показателей для идентификации пожаров

Тип пожара может быть оценён по отдельным показателям, которые можно разделить на три категории:

- 1) высокие значения показателя чаще встречаются у почвенных пожаров;
- 2) высокие значения показателя чаще встречаются у поверхностных пожаров;
- 3) не наблюдается какой-либо зависимости распределения показателя от категории пожара.

К первой категории относятся: площадь, длительность, максимальная радиационная мощность и максимальная температура. Ко второй — минимальная и средняя температура, минимальная и средняя радиационная мощность. К третьей — доля площади, занятая лесом. Пожары, имеющие показатели *первой* категории выше правых пороговых значений, можно отнести к почвенным, а ниже левых пороговых значений — к поверхностным. Пороговые вероятности оценены с помощью функции выживания (*англ.* survival function)  $R(x) = \mathbf{P}\{X > x\}$ , демонстрирующей вероятность того, что показатель  $X$  окажется более некоторого конкретного значения  $x$ .

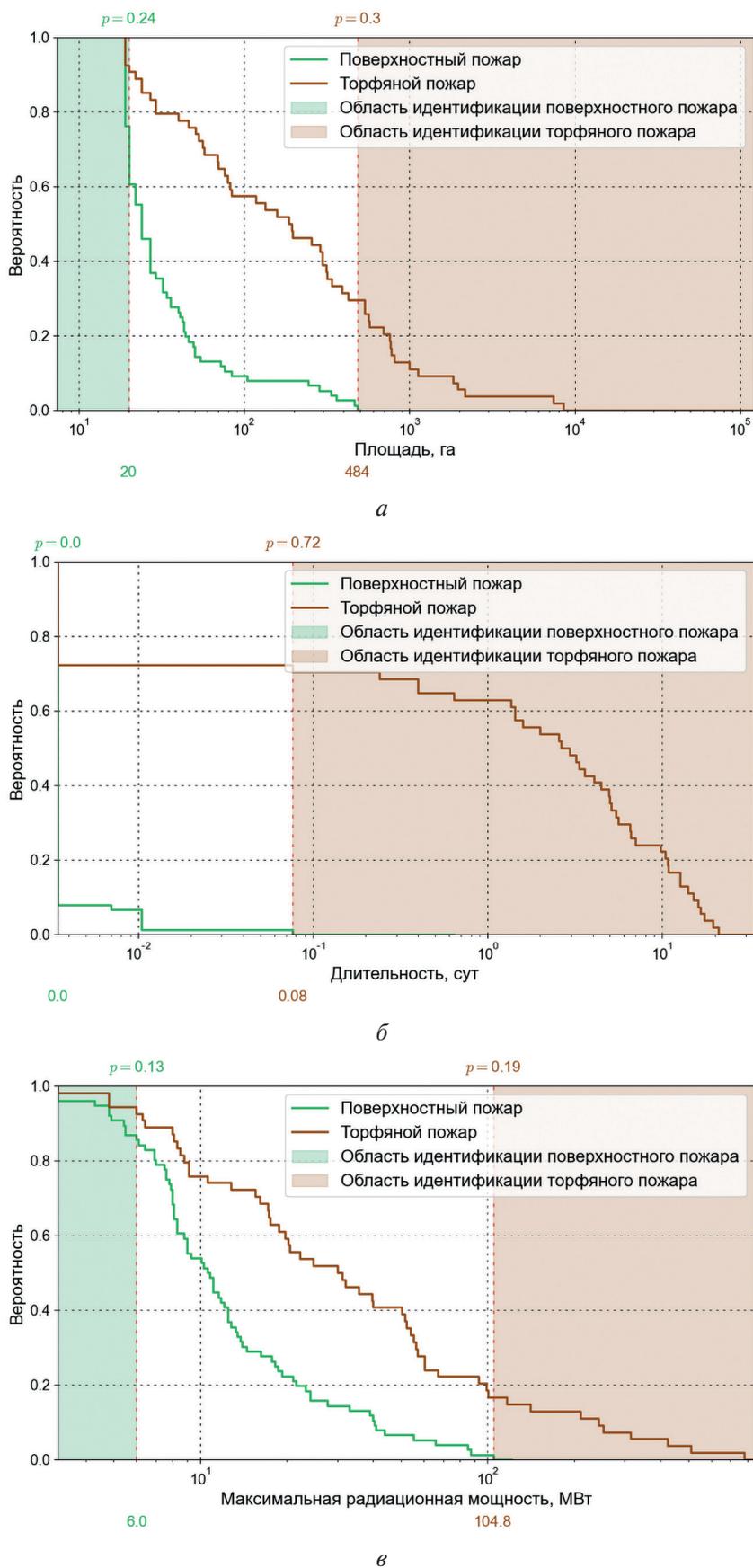


Рис. 4а–в. Функции выживания площади (*а*), длительности (*б*) и максимальной радиационной мощности (*в*) пожара (в логарифмическом масштабе) для поверхностных (зелёная ломаная линия) и почвенных (коричневая ломаная линия) пожаров (продолжение см. на с. 103)

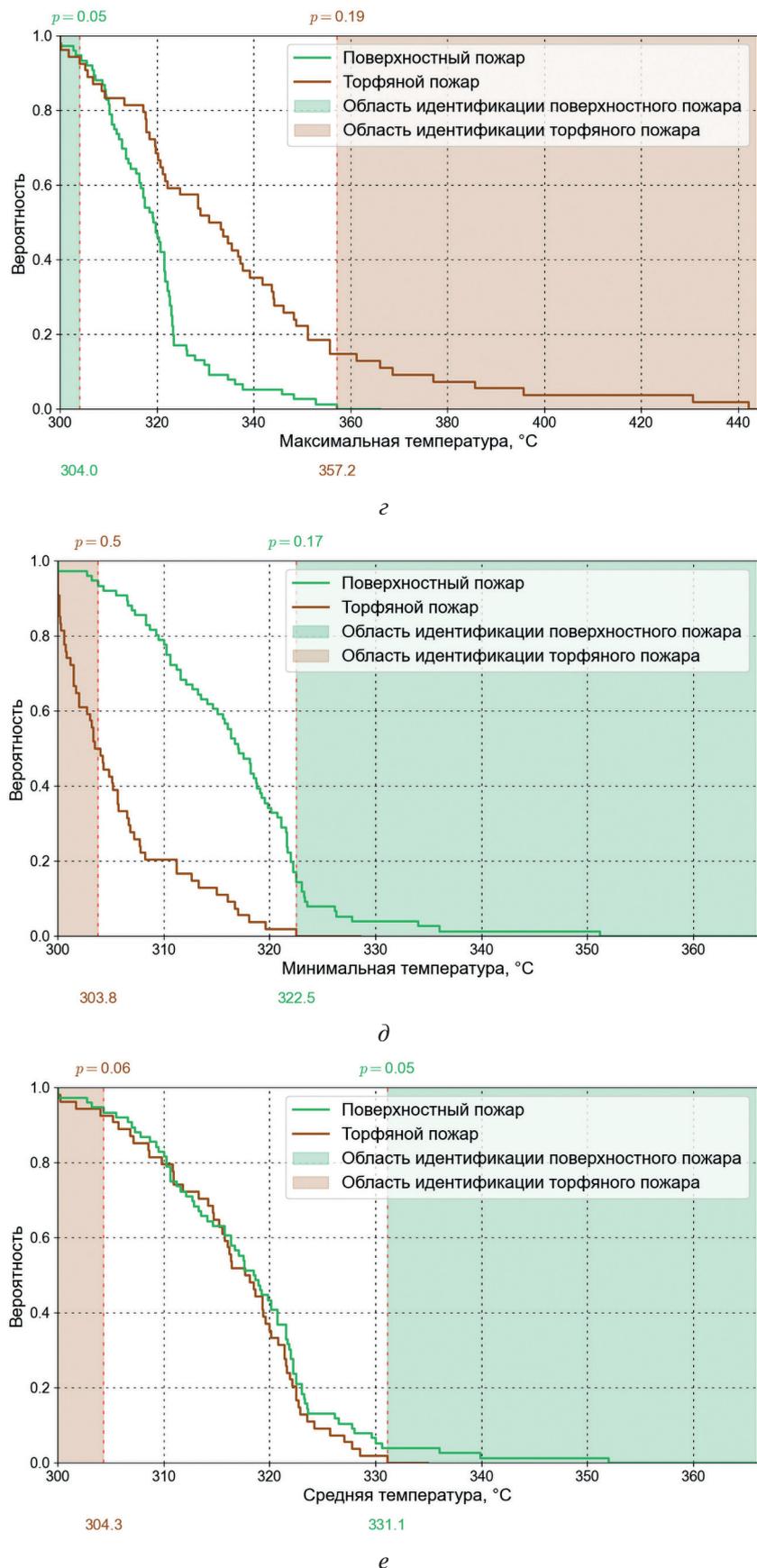


Рис. 4г–е. Функции максимальной (z), минимальной (d) и средней (e) температуры пожара для поверхностных (зелёная ломаная линия) и почвенных (коричневая ломаная линия) пожаров (окончание см. на с. 104)

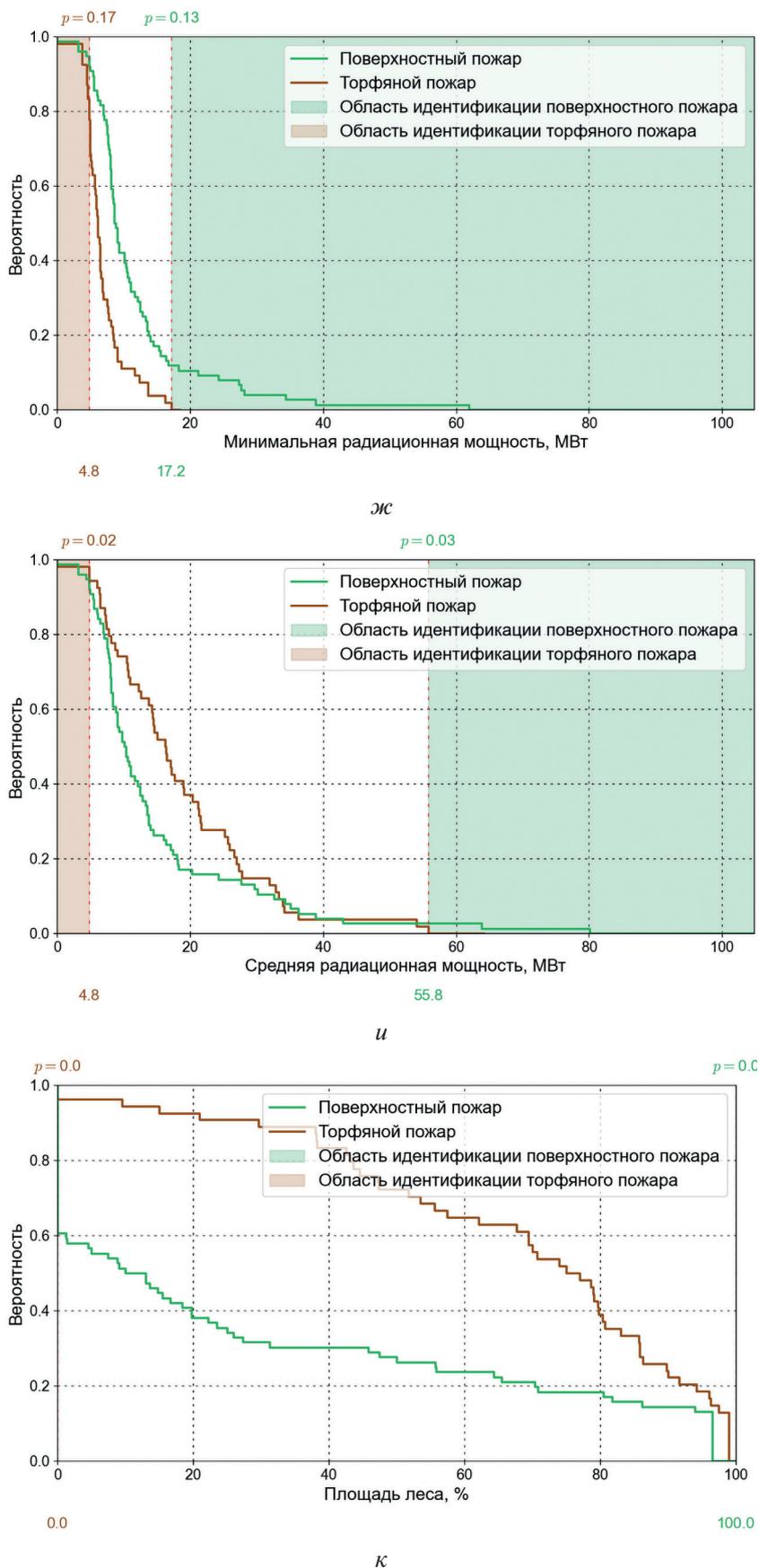


Рис. 4ж–к. Функции минимальной (*ж*) и средней радиационной (*и*) мощности пожара и доли площади пожара, занятой лесом (*к*), для поверхностных (зелёная ломаная линия) и почвенных (коричневая ломаная линия) пожаров

На рис. 4а–г (см. с. 102–103) показаны вероятности  $p$  того, что почвенный пожар имеет показатель выше правого порога (отмечены коричневым цветом), и вероятности  $p$  того, что поверхностный пожар имеет показатель ниже левого порога (отмечены зелёным цветом). То есть эти вероятности характеризуют долю пожаров, которые можно идентифицировать с помощью данного показателя. На рис. 4б:  $p = 0,72$  — вероятность того, что почвенный пожар имеет длительность больше правого порога 0,08 дней (отмечен коричневым цветом), и  $p = 0$  — вероятность того, что поверхностный пожар имеет длительность, меньшую левого порога 0 дней.

### Оценки коэффициентов модели индекса торфяного пожара

Анализ влияния переменных осложняется взаимной зависимостью переменных друг от друга. При изменении состава переменных меняются оценки коэффициентов, их стандартные ошибки и значения статистик Стьюдента и, соответственно, переменные могут оказаться значимыми или незначимыми. Количество сочетаний для девяти переменных слишком велико, поэтому здесь приведены лишь полный и сокращённый варианты. В модель также включён квадрат длительности пожара. Добавление квадратов других переменных, а также их произведений лишь ухудшало модель.

С помощью стандартных ошибок можно легко найти 95%-ю погрешность вычисления коэффициентов, для этого нужно лишь умножить их на 97,5%-й квантиль распределения Стьюдента, который для больших выборок близок к 2.

Как видно из табл. 1, почти все коэффициенты равны 0, если учитывать их погрешность: например, коэффициент при *Avg\_temp* равен  $11,0 \pm 20$ , что означает фактическое равенство 0. Значимыми являются только доля площади леса (*Forest*) и длительность пожара (*Duration*). Рассмотрев различные сочетания переменных, мы остановились на сокращённой модели (табл. 2).

Таблица 1. Параметры полной модели

Переменная	$b_i$	$S_i$	$p_i$
<i>Area</i>	-0,3	0,6	0,5
<i>Forest</i>	0,8	0,25	0,006
<i>Min_frp</i>	0,9	2,1	0,7
<i>Max_frp</i>	7,2	5,8	0,2
<i>Avg_frg</i>	-6,4	6,5	0,3
<i>Min_temp</i>	-3,7	3,8	0,3
<i>Max_temp</i>	-9,7	8,7	0,3
<i>Avg_temp</i>	11,0	10,0	0,3
<i>Duration</i>	3,1	1,5	0,03
<i>Duration</i> <sup>2</sup>	0,4	2,0	0,8

Таблица 2. Параметры сокращённой модели

Переменная	$b_i$	$S_i$	$p_i$
<i>Forest</i>	0,9	0,3	0,005
<i>Max_frp</i>	1,0	0,5	0,054
<i>Avg_temp</i>	-0,9	0,4	0,012
<i>Duration</i>	3,0	0,6	0,000

Пожары на *рис. 4д–и*, имеющие показатели *второй* категории выше правых пороговых значений, можно отнести к поверхностным, а ниже левых пороговых значений — к почвенным. На *рис. 4д*:  $p = 0,17$  — вероятность того, что поверхностный пожар имеет минимальную температуру больше правого порога в  $322,5\text{ }^{\circ}\text{C}$  (отмечен зелёным цветом), и  $p = 0,5$  — вероятность того, что почвенный пожар имеет минимальную температуру ниже левого порога в  $303,8\text{ }^{\circ}\text{C}$  (отмечен коричневым цветом). Доля площади, занятой лесом, сама по себе никак не позволяет классифицировать пожары (см. *рис. 4к*).

Чтобы проиллюстрировать способность предлагаемого индекса прогнозировать вид пожара, вычислим его значения для имеющихся данных (по которым оценивались коэффициенты), построим графики распределения вероятностей по отдельности для поверхностных и почвенных пожаров и вычислим левое и правое пороговые значения (*рис. 5*). Предлагаемый индекс торфяного пожара позволяет идентифицировать больше пожаров, чем каждый из показателей по отдельности (*рис. 6*). Из рисунка видно, что  $p = 0,76$  — вероятность того, что почвенный пожар имеет индекс больше правого порога  $0,52$  (отмечен коричневым цветом), и  $p = 0,66$  — вероятность того, что поверхностный пожар имеет индекс ниже левого порога  $0,1$  (отмечен зелёным цветом).

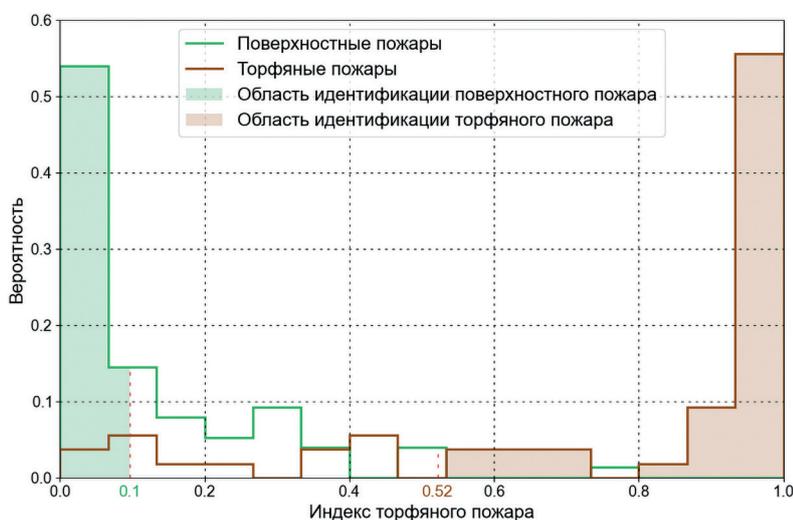


Рис. 5. Распределение вероятности индекса торфяного пожара для поверхностных и почвенных пожаров

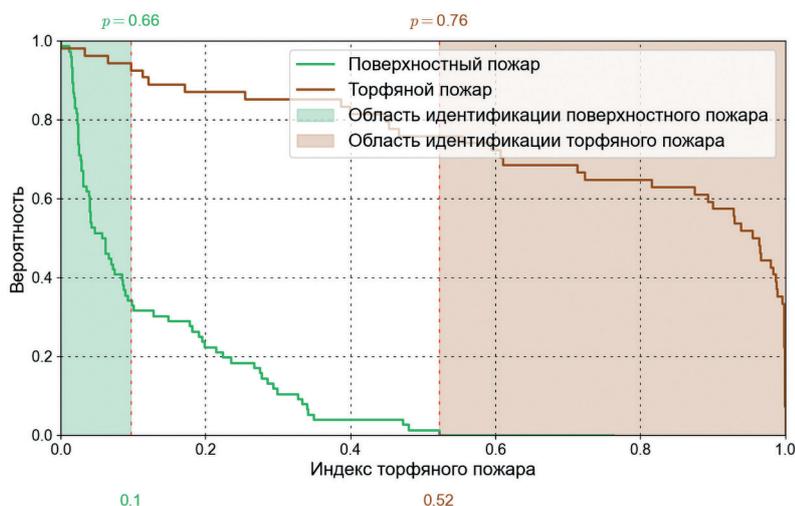


Рис. 6. Функции выживания индекса торфяного пожара для поверхностных (зелёная ломаная линия) и почвенных (коричневая ломаная линия) пожаров

Доля площади, занятой лесом, сама по себе не позволяет классифицировать пожары (см. рис. 4к), однако оказывается значимой в сочетании с другими показателями при построении индекса торфяного пожара.

### Сравнение качества идентификации пожаров с помощью различных показателей

Доля пожаров, которые можно идентифицировать, позволила нам установить пороговые значения и сравнить качество классификации с помощью различных показателей. Также качество классификации можно сравнивать с помощью доли правильно идентифицированных пожаров. Введём следующие обозначения:  $X$  — некоторый измеряемый показатель пожара, например площадь или максимальная температура, рассматриваемый как случайная величина;  $x$  — одно из его возможных неслучайных значений;  $\bar{x}$  — правое пороговое значение;  $\underline{x}$  — левое пороговое значение;  $I_p$  — индикатор почвенного пожара:

$$I_p = \begin{cases} 1, & \text{если пожар почвенный,} \\ 0, & \text{если пожар поверхностный.} \end{cases}$$

Тогда качество идентификации показателями первой категории (больше значение у почвенных пожаров, меньше — у поверхностных) можно описать четырьмя условными вероятностями:

$\mathbf{P}\{X > \bar{x} | I_p = 1\}$  — вероятность того, что почвенный пожар будет иметь показатель больше правого порога;

$\mathbf{P}\{I_p = 1 | X > \bar{x}\}$  — вероятность того, что пожар с показателем больше правого порога окажется почвенным;

$\mathbf{P}\{X < \underline{x} | I_p = 0\}$  — вероятность того, что поверхностный пожар будет иметь показатель меньше левого порога;

$\mathbf{P}\{I_p = 0 | X < \underline{x}\}$  — вероятность того, что пожар с показателем меньше левого порога окажется поверхностным.

Напомним, что условная вероятность  $\mathbf{P}\{A | B\}$  показывает вероятность события  $A$ , если известно, что событие  $B$  произошло. Условную вероятность можно оценить с помощью статистических данных по формуле:

$$\mathbf{P}\{A | B\} = \frac{\mathbf{P}\{A, B\}}{\mathbf{P}\{B\}} \approx \frac{N_{A,B}}{N_B},$$

где  $N_{A,B}$  — количество пожаров, для которых выполняются оба условия,  $A$  и  $B$ , одновременно;  $N_B$  — количество пожаров, для которых выполняется условие  $B$ . То есть условная вероятность — это доля количества пожаров, для которых выполняется условие  $A$ , среди всех пожаров, для которых выполняется условие  $B$ .

Рассмотрим, например, площадь пожара рис. 4а и табл. 3. Среди всех почвенных пожаров большую площадь (больше правого порога) имеет около 30 %. Но эти 30 % составляют более 95 % от всех пожаров с большой площадью. То есть если мы наблюдаем пожар с большой площадью, то с уверенностью 95 % можно сказать, что он почвенный. Но таким образом мы можем идентифицировать лишь 30 % почвенных пожаров, остальные 70 % останутся неотличимыми от поверхностных.

Из табл. 3 следует, что показатели пожара  $Area$ ,  $Max\_frp$  и  $Max\_temp$  позволяют выявить довольно много почвенных пожаров и большинство из выявленных действительно являются почвенными пожарами (столбцы 2 и 3). Также эти показатели позволяют выявить немногочисленные поверхностные пожары, причём более половины из них идентифицируются неверно (столбцы 4 и 5). Длительность позволяет идентифицировать почти три четверти пожаров (и почти все они идентифицируются правильно (столбцы 2 и 3)), но не позволяет выявить

ни одного поверхностного пожара (столбцы 4 и 5). Только *индекс торфяного пожара* позволяет достаточно хорошо идентифицировать как почвенные (столбцы 2 и 3), так и поверхностные пожары (столбцы 4 и 5).

Таблица 3. Условные вероятности, демонстрирующие качество идентификации с помощью показателей первой категории (большее значение — у почвенных пожаров, меньшее — у поверхностных)

Показатель	$P\{X > \bar{x}   I_p = 1\}, \%$	$P\{I_p = 1   X > \bar{x}\}, \%$	$P\{X < \underline{x}   I_p = 0\}, \%$	$P\{I_p = 0   X < \underline{x}\}, \%$
1	2	3	4	5
<i>Peat fire index</i>	<b>76,23</b>	<b>95,45</b>	<b>66,14</b>	<b>94,23</b>
<i>Area</i> , га	29,63	94,44	23,68	46,30
<i>Max_frp</i> , МВт	18,52	90,91	13,16	43,59
<i>Max_temp</i> , °С	18,52	90,91	5,26	41,13
<i>Duration</i> , дни	72,22	97,50	0	0

Качество идентификации показателями второй категории (большее значение — у поверхностных пожаров, меньшее — у почвенных) можно описать другими аналогичными условными вероятностями:

$P\{X > \bar{x} | I_p = 0\}$  — вероятность того, что поверхностный пожар будет иметь показатель больше правого порога;

$P\{I_p = 0 | X > \bar{x}\}$  — вероятность того, что пожар с показателем больше правого порога окажется поверхностным;

$P\{X < \underline{x} | I_p = 1\}$  — вероятность того, что почвенный пожар будет иметь показатель меньше левого порога;

$P\{I_p = 1 | X < \underline{x}\}$  — вероятность того, что пожар с показателем меньше левого порога окажется почвенным.

Показатели второй группы *табл. 4* позволяют более надёжно выявить поверхностные пожары (столбец 3), однако лишь незначительную часть пожаров можно исследовать с их помощью (столбец 2).

Таблица 4. Условные вероятности, демонстрирующие качество идентификации с помощью показателей второй категории (большее значение — у поверхностных пожаров, меньшее — у почвенных)

Показатель	$P\{X > \bar{x}   I_p = 0\}, \%$	$P\{I_p = 0   X > \bar{x}\}, \%$	$P\{X < \underline{x}   I_p = 1\}, \%$	$P\{I_p = 1   X < \underline{x}\}, \%$
1	2	3	4	5
<i>Min_frp</i> , МВт	13,16	90,91	16,67	61,54
<i>Avg_frp</i> , МВт	2,63	75,00	1,85	57,60
<i>Min_temp</i> , °С	17,11	92,86	50,00	72,00
<i>Avg_temp</i> , °С	5,26	80,00	5,56	58,54

Дополнительную информацию о качестве идентификации можно получить, вычислив такие же условные вероятности в расчёте на единицу площади, занятой пожарами каждого типа (*табл. 5 и 6*). Эти вероятности можно оценить с помощью статистических данных по формуле:

$$P_s\{A | B\} = \frac{P_s\{A, B\}}{P_s\{B\}} \approx \frac{S_{A,B}}{S_B},$$

где  $S_{A,B}$  — суммарная площадь пожаров, для которых выполняются оба события,  $A$  и  $B$ , одновременно;  $S_B$  — суммарная площадь пожаров, для которых выполняется событие  $B$ . То есть такая вероятность — это доля площади, занятая пожарами, для которых выполняется условие  $A$ , относительно площади всех пожаров, для которых выполняется условие  $B$ .

Таблица 5. Условные вероятности в расчёте на единицу площади, демонстрирующие качество идентификации с помощью показателей первой категории (большее значение — у почвенных пожаров, меньшее — у поверхностных)

Показатель	$P_s\{X > \bar{x}   I_p = 1\}, \%$	$P_s\{I_p = 1   X > \bar{x}\}, \%$	$P_s\{X < \underline{x}   I_p = 0\}, \%$	$P_s\{I_p = 0   X < \underline{x}\}, \%$
1	2	3	4	5
<b>Peat fire index</b>	<b>99,38</b>	<b>99,81</b>	<b>44,57</b>	<b>94,48</b>
<i>Area</i> , га	96,83	99,35	7,44	81,82
<i>Max_frp</i> , МВт	93,35	99,64	4,18	75,09
<i>Max_temp</i> , °С	93,36	99,67	1,57	54,29
<i>Duration</i> , дней	99,73	99,56	0	0

Из табл. 5 следует, что с помощью показателей первой категории *индекс торфяного пожара*, *Area*, *Max\_frp*, *Max\_temp*, *Duration* площадь почвенных пожаров почти всегда идентифицируется правильно (с вероятностью более 90 % — столбец 2) и почти вся выявленная площадь действительно является площадью почвенных пожаров (более 99 % — столбец 3). Только *индекс торфяного пожара* позволяет идентифицировать некоторую площадь поверхностных пожаров (меньше половины — столбец 4), другие показатели практически непригодны для определения площади поверхностных пожаров.

Таблица 6. Условные вероятности в расчёте на единицу площади, демонстрирующие качество идентификации с помощью показателей второй категории (большее значение — у поверхностных пожаров, меньшее — у почвенных)

Показатель	$P_s\{X > \bar{x}   I_p = 0\}, \%$	$P_s\{I_p = 0   X > \bar{x}\}, \%$	$P_s\{X < \underline{x}   I_p = 1\}, \%$	$P_s\{I_p = 1   X < \underline{x}\}, \%$
1	2	3	4	5
<i>Min_frp</i> , МВт	25,76	78,76	3,80	98,63
<i>Avg_frp</i> , МВт	11,83	0,47	0,01	19,61
<i>Min_temp</i> , °С	9,90	82,87	96,48	99,92
<i>Avg_temp</i> , °С	2,83	11,60	0,04	40,00

Из табл. 6 следует, что площадь почвенных пожаров почти всегда идентифицируется правильно только с помощью *Min\_temp* (столбцы 4 и 5), остальные показатели дают неудовлетворительный результат. При этом ни один из показателей второй категории не позволяет корректно идентифицировать поверхностные пожары (столбец 2), однако те пожары, которые с помощью *Min\_frp* и *Min\_temp* могут быть идентифицированы как поверхностные, в большинстве случаев действительно являются таковыми (столбец 3).

### Заключение

Торфяные (подземные) пожары отличаются от других природных пожаров (поверхностных) длительностью, выбросом опасных для человека продуктов горения, потерей углерода и другими воздействиями на окружающую среду. В связи с этим их идентификация представляется важной задачей, особенно с учётом того, что не все пожары, происходящие на торфяных

болотах и осушенных торфяниках, заглубляются в почву, становясь подземными торфяниками. Из-за трудной проходимости наземными методами сложно отделить гари от торфяных пожаров.

Нами предложен метод детектирования торфяных (подземных) пожаров на основе анализа дистанционных характеристик площадей разных типов пожара (в рамках границ торфяников и вне их), полученных на основе спутниковых данных спектрорадиометра MODIS низкого пространственного разрешения (1 км) о тепловых аномалиях. Для подтверждения факта возгорания торфа на пройденных огнём площадях использовались наземные исследования 2017 г.

Проведённые исследования показали, что характеристики пожаров, такие как минимальные, максимальные и средние значения радиационной мощности FRP и температуры, общая площадь пожара, занятая до пожара лесом площадь, а также длительность горения, могут использоваться для отнесения пожара к подземным или поверхностным.

Отдельные параметры можно использовать для идентификации, руководствуясь пороговыми значениями. Пороговые вероятности оценивались с помощью функции выживания, демонстрирующей вероятность того, что показатель окажется более некоторого конкретного значения. Если значение показателя выходит за пороговое значение, можно с уверенностью сказать, что пожар является торфяным. Была определена достаточно неплохая возможность идентифицировать торфяные пожары с применением порогового значения показателя длительности пожара (больше 0,08 дней) с достоверностью по количеству 72 % от торфяных (почвенных) и 98 % из всех, однако выделение поверхностных пожаров оказалось по этому показателю невозможным.

В поиске наилучшего разделения двух типов пожаров был разработан оригинальный индекс торфяного пожара для определения наилучшего сочетания нескольких параметров, включая максимальное значение FRP, среднюю температуру горения, продолжительность горения и площадь возгорания. Предлагаемая модель индекса торфяных пожаров показывает степень уверенности в том, что данный пожар является торфяным. В результате проведённых расчётов был определён порог индекса 0,52, выше которого выявляются торфяные пожары с вероятностью 76 % от торфяных (почвенных), и в большинстве случаев они действительно торфяные — 95 %, и порог индекса 0,1, ниже которого выявляются поверхностные пожары с вероятностью 66 %, и в большинстве случаев они действительно поверхностные — 94 %.

Необходимо учитывать, что доля выявленных торфяных и поверхностных пожаров может определяться как по суммарному количеству пожаров, так и по общей площади. Дополнительная информация о качестве идентификации пожаров была получена в расчёте на единицу площади, занятой пожарами каждого типа. Учитывая тот факт, что торфяные пожары имеют большую площадь, было определено, что доля по площади выявляемых торфяных пожаров по тем же критериям получается значительно выше, чем доля по количеству с помощью всех показателей первой категории: индекса торфяных пожаров, площади, максимума FRP, максимума температуры и длительности.

Путём анализа доли выявленных пожаров как по количеству, так и по площади было определено, что наиболее эффективным по сравнению с другими показателями оказывается разработанный оригинальный индекс торфяного пожара, позволяющий не только выявлять с высокой вероятностью приоритетные в данной работе торфяные пожары, но и определять поверхностные.

Корректная идентификация типа пожара возможна при выполнении погодных условий, близких к условиям лета 2010 г. Для других условий требуются дополнительные исследования. В дальнейшем для анализа предполагается использовать более широкий спектр показателей, в том числе климатических. Результаты требуют проверки на примере других территорий, однако весьма убедительно свидетельствуют о возможности использования дистанционных данных для детектирования торфяных пожаров. В качестве конечного результата исследований мы ожидаем получить универсальные пороговые значения некоторых показателей пожарной активности, использование которых позволит обнаруживать торфяные пожары в районах, где расположение торфяников плохо изучено.

Работа была начата в рамках реализации важнейшего инновационного проекта государственного значения «Разработка системы наземного и дистанционного мониторинга пулов углерода и потоков парниковых газов на территории Российской Федерации, обеспечение создания системы учёта данных о потоках климатически активных веществ и бюджете углерода в лесах и других наземных экологических системах» (рег. № 123030300031-6), а завершена и оформлена при поддержке Российского научного фонда (проект № 23-74-00067).

Авторы благодарны Макарову Дмитрию (Институт лесоведения РАН) за наземное обследование торфяных гарей, Анне Возбранной (Национальный парк «Мещера») за предоставленные фотографии, Черненко Полине за помощь в оформлении статьи, а также ЦКП «ИКИ-Мониторинг» ИКИ РАН за предоставленные данные и лично Ивану Балашову за подготовку данных и Евгению Лупяну за советы и поддержку.

## Литература

1. *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.
2. *Вомперский С. Э., Иванов А. И., Цыганова О. П., Валяева Н. А., Глухова Т. В., Дубинин А. И., Глухов А. И., Маркелова Л. Г.* Заболоченные органогенные почвы и болота России и запас углерода в их торфах // *Почвоведение*. 1994. № 12. С. 17–25.
3. *Вомперский С. Э., Сирин А. А., Сальников А. А., Цыганова О. П., Валяева Н. А.* Оценка площади болотных и заболоченных лесов России // *Лесоведение*. 2011. № 5. С. 3–11.
4. *Глухова Т. В., Сирин А. А.* Потери почвенного углерода при пожаре на осушенном лесном верховом болоте // *Почвоведение*. 2018. № 5. С. 580–588.
5. *Лупян Е. А., Прошин А. А., Бурцев М. А. и др.* Опыт эксплуатации и развития центра коллективного пользования системами архивации, обработки и анализа спутниковых данных (ЦКП «ИКИ-Мониторинг») // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2019. Т. 16. № 3. С. 151–170. DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-3-151-170.
6. *Лупян Е. А., Балашов И. В., Сенько К. С. и др.* Обновленный многолетний ряд данных о пожарах на территории России по данным MODIS коллекции 6 // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса: материалы 18-й Всероссийской открытой конф. Москва, ИКИ РАН, 16–20 нояб. 2020*. С. 341. DOI: 10.21046/18DZZconf-2020a.
7. *Лупян Е. А., Стыценко Ф. В., Сенько К. С. и др.* 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.
8. *Ревич Б. А., Шапошников Д. А., Першаген Г.* Новая эпидемиологическая модель по оценке воздействия аномальной жары и загрязненного атмосферного воздуха на смертность населения (на примере Москвы 2010 г.) // *Профилактическая медицина*. 2015. Т. 18. № 5. С. 29–33.
9. *Сирин А., Минаева Т., Возбранная А., Барталев С.* Как избежать торфяных пожаров? // *Наука в России*. 2011. № 2. С. 13–22.
10. *Сирин А. А., Маслов А. А., Валяева Н. А., Цыганова О. П., Глухова Т. В.* Картографирование торфяных болот московской области по данным космической съемки высокого разрешения // *Лесоведение*. 2014. № 5. С. 65–71.
11. *Сирин А. А., Медведева М. А., Макаров Д. А. и др.* Мониторинг растительного покрова вторично обводненных торфяников Московской области // *Вестн. Санкт-Петербургского ун-та. Науки о Земле*. 2020. Т. 65. № 2. С. 314–336. DOI: 10.21638/spbu07.2020.206.
12. *Сирин А. А., Медведева М. А., Ильясов Д. В. и др.* Обводненные торфяники в климатической отчетности Российской Федерации // *Фундаментальная и прикладная климатология*. 2021. Т. 7. № 3. С. 84–112. DOI: 10.21513/2410-8758-2021-3-84-112.
13. *Сирин А. А., Медведева М. А., Иткин В. Ю. и др.* Выявление торфяных пожаров для оценки эмиссии парниковых газов // *Метеорология и гидрология*. 2022. № 10. С. 33–45. DOI: 10.52002/0130-2906-2022-10-33-45.
14. *Суслов В. И., Ибрагимов Н. М., Талышева Л. П., Цыплаков А. А.* Эконометрия: учеб. пособие. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2005. 741 с.
15. 2013 Supplement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories: Wetlands. IPCC Methodology Report / eds. Hiraishi T., Krug T., Tanabe K., Srivastava N., Baasansuren J., Fukuda M.,

- Troxler T. G. Switzerland, 2014. 354 p. <https://www.ipcc.ch/publication/2013-supplement-to-the-2006-ipcc-guidelines-for-national-greenhouse-gas-inventories-wetlands/>.
16. 2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories / eds. Calvo Buendia E., Tanabe K., Kranjc A., Baasansuren J., Fukuda M., Ngarize S., Osako A., Pyrozhenko Y., Sherman P., Federici S. IPCC, Switzerland, 2019. <https://www.ipcc.ch/report/2019-refinement-to-the-2006-ipcc-guidelines-for-national-greenhouse-gas-inventories/>.
  17. Assessment on peatlands, biodiversity and climate change / eds. Parish F., Sirin A., Charman D., Joosten H., Minayeva T., Silvius M., Stringer L. Wageningen: Global Environment Centre, Kuala Lumpur and Wetlands Intern., 2008. 179 p.
  18. *Barriopedro D., Fischer E. M., Luterbacher J. et al.* The hot summer of 2010: redrawing the temperature record map of Europe // *Science*. 2011. V. 332. Iss. 6026. P. 220–224. DOI: 10.1126/science.1201224.
  19. *Blain D., Row C., Alm J., Byrne K., Parish F., Duchemin É., Huttunen J. T., Tremblay A., Delmas R., Menezes C. F. S., Delmas R., Minayeva T., Pinguelli Rosa L. P., Sirin A.* V. 4: Agriculture, forestry and other land use // 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories / eds. Eggleston H. S., Buendia L., Miwa K., Ngara T., Tanabe K. Japan: IGES, 2006. Ch. 7: Wetlands. P. 7.1–7.24.
  20. *Burke C., Wich S., Kusin K. et al.* Thermal-Drones as a Safe and Reliable Method for Detecting Subterranean Peat Fires // *Drones*. 2019. V. 3. Iss. 1. Article 23. DOI: 10.3390/drones3010023.
  21. *Cahyono B. K., Aditya T., Istarno.* The Determination of Priority Areas for the Restoration of Degraded Tropical Peatland Using Hydrological, Topographical, and Remote Sensing Approaches // *Land*. 2022. V. 11. Iss. 7. Article 1094. DOI: 10.3390/land11071094.
  22. *Freeborn P. H., Wooster M. J., Roy D. P., Cochrane M. A.* Quantification of MODIS fire radiative power (FRP) measurement uncertainty for use in satellite-based active fire characterization and biomass burning estimation // *Geophysical Research Letters*. 2014. V. 41. Iss. 6. P. 1988–1994. DOI: 10.1002/2013GL059086.
  23. *Giglio L., Descloitres J., Justice C. O., Kaufman Y. J.* An enhanced contextual fire detection algorithm for MODIS // *Remote Sensing of Environment*. 2003. V. 87. Iss. 2–3. P. 273–282.
  24. *Hu Y., Fernandez-Anez N., Smith T. E. L., Rein G.* Review of emissions from smouldering peat fires and their contribution to regional haze episodes // *Intern. J. Wildland Fire*. 2018. V. 27. No. 5. P. 293–312. DOI: 10.1071/WF17084.
  25. *Huang X., Rein G.* Downward spread of smouldering peat fire: the role of moisture, density and oxygen supply // *Intern. J. Wildland Fire*. 2017. V. 26. No. 11. P. 907–918. DOI: 10.1071/WF16198.
  26. *Jia G., Shevliakova E., Artaxo P., De Noblet-Ducoudré N., Houghton R., House J., Kitajima K., Lennard C., Popp A., Sirin A., Sukumar R., Verchot L.* Land–climate interactions // *Climate Change and Land: An IPCC special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems* / eds. Shukla P. R., Skea J., Calvo Buendia E., Masson-Delmotte V., Pörtner H.-O., Roberts D. C., Zhai P., Slade R., Connors S., van Diemen R., Ferrat M., Haughey E., Luz S., Neogi S., Pathak M., Petzold J., Portugal Pereira J., Vyas P., Huntley E., Kissick K., Belkacemi M., Malley J. 2019. P. 131–248. <https://www.ipcc.ch/srccl/>.
  27. *Joosten H., Sirin A., Couwenberg J. et al.* The role of peatlands in climate regulation // *Peatland Restoration and Ecosystem Services: Science, Policy and Practice. Ecological Reviews* / eds. Bonn A., Joosten H., Evans M., Stoneman R., Allott T. Cambridge: Cambridge University Press, 2016. P. 63–76. DOI: 10.1017/CBO9781139177788.005.
  28. *Kaufman Y. J., Justice C. O., Flynn L. P., Kendall J. D., Prins E. M., Giglio L., Ward D. E., Menzel W. P., Setzer A. W.* Potential global fire monitoring from EOS-MODIS // *J. Geophysical Research*. 1998. V. 103. No. D24. P. 32215–32238.
  29. *Konovalov I. B., Beekmann M., Kuznetsova I. N. et al.* Atmospheric impacts of the 2010 Russian wildfires: integrating modelling and measurements of an extreme air pollution episode in the Moscow region // *Atmospheric Chemistry and Physics*. 2011. V. 11. Iss. 19. P. 10031–10056. DOI: 10.5194/acp-11-10031-2011.
  30. *Leifeld J., Wüst-Galley C., Page S.* Intact and managed peatland soils as a source and sink of GHGs from 1850 to 2100 // *Nature Climate Change* 2019. V. 9. Iss. 12. P. 945–947. DOI: 10.1038/s41558-019-0615-5.
  31. *Loisel J., Gallego-Sala A. V., Amesbury M. J. et al.* Expert assessment of future vulnerability of the global peatland carbon sink // *Nature Climate Change*. 2021. V. 11. Iss. 1. P. 70–77. DOI: 10.1038/s41558-020-00944-0.
  32. *Marlier M. E., Liu T., Yu K. et al.* Fires, smoke exposure, and public health: An integrative framework to maximize health benefits from peatland restoration // *GeoHealth*. 2019. V. 3. Iss. 7. P. 178–189. DOI: 10.1029/2019GH000191.
  33. *Minayeva T., Sirin A., Stracher G. B.* The Peat Fires of Russia // *Coal and Peat Fires: A Global Perspective. V. 2: Photographs and Multimedia Tours* / eds. Stracher G. B., Prakash A., Sokol E. V. Amsterdam: Elsevier, 2013. P. 375–394.

34. Nelson K., Chasme L., Hopkinso C. Quantifying Lidar Elevation Accuracy: Parameterization and Wavelength Selection for Optimal Ground Classifications Based on Time since Fire/Disturbance // Remote Sensing. 2022. V. 14. Article 5080. DOI: 10.3390/rs14205080.
35. Page S. E., Siegert F., Rieley J. O. et al. The amount of carbon released from peat and forest fires in Indonesia during 1997 // Nature. 2002. V. 420. No. 6911. P. 61–65. DOI: 10.1038/nature01131.
36. Page S. E., Rieley J. O., Banks C. J. Global and regional importance of the tropical peatland carbon pool // Global Change Biology. 2011. V. 17. Iss. 2. P. 798–818. DOI: 10.1111/j.1365-2486.2010.02279.x.
37. Poulter B., Christensen Jr. N. L., Halpin P. N. Carbon emissions from a temperate peat fire and its relevance to interannual variability of trace atmospheric greenhouse gases // J. Geophysical Research: Atmospheres. 2006. V. 111. Article D06301. DOI: 10.1029/2005JD006455.
38. Prasetyo L. B., Setiawan Y., Condoro A. A. et al. Assessing Sumatran Peat Vulnerability to Fire under Various Condition of ENSO Phases Using Machine Learning Approaches // Forests. 2022. V. 13. Iss. 6. Article 828. DOI: 10.3390/f13060828.
39. Rein G. Smouldering fires and natural fuels // Fire phenomena and the earth system: An interdisciplinary guide to fire science / ed. Belcher C. M. N.Y.: John Wiley and Sons Limited, 2013. P. 15–34. DOI: 10.1002/9781118529539.
40. Rein G., Huang X. Smouldering Wildfires in Peatlands, Forests and the Arctic: Challenges and Perspectives // Current Opinion in Environmental Science and Health. 2021. V. 24. Article 100296. DOI: 10.1016/j.coesh.2021.100296.
41. Rossi S., Tubiello F. N., Prospero P. et al. FAOSTAT estimates of greenhouse gas emissions from biomass and peat fires // Climatic Change. 2016. V. 135. Iss. 3–4. P. 699–711. DOI: 10.1007/s10584-015-1584-y.
42. Safronov A. N., Fokeeva E. V., Rakitin V. S. et al. Severe Wildfires near Moscow, Russia in 2010: Modeling of Carbon Monoxide Pollution and Comparisons with Observations // Remote Sensing. 2015. V. 7. Iss. 1. P. 395–429. DOI: 10.3390/rs70100395.
43. Schulte M. L., McLaughlin D. L., Wurster F. C. et al. Short- and long-term hydrologic controls on smouldering fire in wetland soils // Intern. J. Wildland Fire. 2019. V. 28. No. 3. P. 177–186. DOI: 10.1071/WF18086.
44. Sirin A., Medvedeva M. Remote Sensing Mapping of Peat-Fire-Burnt Areas: Identification among Other Wildfires // Remote Sensing. 2022. V. 14. Article 194. DOI: 10.3390/rs14010194.
45. Sirin A., Minayeva T., Yurkovskaya T. et al. Russian Federation (European Part) // Mires and Peatlands of Europe: Status, Distribution and Conservation / eds. Joosten H., Tanneberger F., Moen A. Stuttgart: Schweizerbart Science Publ., 2017. P. 589–616. DOI: 10.1127/mireseurope/2017/0001-0049.
46. Sirin A., Maslov A., Makarov D. et al. Assessing Wood and Soil Carbon Losses from a Forest-Peat Fire in the Boreo-Nemoral Zone // Forests. 2021. V. 12. Iss. 7. Article 880. DOI: 10.3390/f12070880.
47. Tanneberger F., Tegetmeyer C., Busse S. et al. The peatland map of Europe // Mires Peat. 2017. V. 19. Article 22. DOI: 10.19189/MaP.2016.OMB.264.
48. Turetsky M. R., Benscotter B., Page S. et al. Global vulnerability of peatlands to fire and carbon loss // Nature Geoscience. 2015. V. 8. No. 1. P. 11–14. DOI: 10.1038/ngeo2325.
49. Usup A., Hayasaka H. Peatland Fire Weather Conditions in Central Kalimantan, Indonesia // Fire. 2023. V. 6. Iss. 5. Article 182. DOI: 10.3390/fire6050182.
50. Yuan H., Restuccia F., Rein G. Spontaneous ignition of soils: a multi-step reaction scheme to simulate self-heating ignition of smouldering peat fires // Intern. J. Wildland Fire. 2021. V. 30. No. 6. P. 440–453. DOI: 10.1071/WF19128.

## Analysis of temperature anomaly indicators to identify peat fires

M. A. Medvedeva<sup>1</sup>, V. Yu. Itkin<sup>1,2</sup>, A. A. Sirin<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Institute of Forest Science RAS, Uspenskoye 143030, Moscow Region, Russia  
E-mail: eveeza@yandex.ru

<sup>2</sup> Gubkin University, Moscow 119991, Russia  
E-mail: itkinv@gubkin.ru

Peat fires differ from other wildfires in their duration, carbon losses, emissions of greenhouse gases and highly hazardous products of combustion, and other environmental impacts. Peatland fires can be identified by overlaying fire data obtained by Terra/Aqua Moderate Resolution Imaging

Spectroradiometer (MODIS) hotspots on existing maps of peatland distribution. However, not all wildfires that occur in peat bogs and drained peatlands become subterranean (peat) fires. The possibility of using fire parameters (Fire Radiation Power — FRP, temperature, duration, etc.) derived from MODIS data to detect peat fires and to separate them from surface fires was analysed using data from the large-scale fires of 2010 in the central European part of Russia. A special peat-fire-index based on the use of several parameters (maximum FRP and burning temperature values, burning duration and fire area) was proposed and tested, which showed up to 98 % accuracy for the detection of peat fires. The results require testing with other areas, but provide strong evidence that remote sensing data can be used to detect peat fires.

**Keywords:** remote sensing, thermal data, peatlands, hotspots, vegetation cover, Terra/Aqua MODIS, fire index

Accepted: 31.10.2023

DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-6-92-116

## References

1. Bartalev S.A., Egorov V.A., Efremov V.Yu., Loupian E.A., Stytsenko F.V., Flitman E.V., Integrated burnt area assessment based on combine use of multi-resolution MODIS and Landsat-TM/ETM satellite data, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2012, Vol. 9, No. 2, pp. 9–27 (in Russian).
2. Vompersky S.E., Ivanov A.I., Tsyganova O.P., Valyaeva N.A., Dubinin A.I., Glukhov A.I., Markelova L.G., Bog organic soils and bogs of Russia and carbon pool of their peats, *Eurasian Soil Science*, 1996, Vol. 28, pp. 91–105.
3. Vompersky S.E., Sirin A.A., Salnikov A.A. et al., Estimation of Forest Cover Extent over Peatland and Paludified Shallow Peatlands in Russia, *Contemporary Problems of Ecology*, 2011, Vol. 4, pp. 734–741, DOI: 0.1134/s1995425511070058.
4. Glukhova T.V., Sirin A.A., Losses of soil carbon upon a fire on a drained forested raised bog, *Eurasian Soil Science*, 2018, No. 51, pp. 542–549, DOI: 10.1134/S1064229318050034.
5. Loupian E.A., Proshin A.A., Bourtsev M.A. et al., Experience of development and operation of the IKI-Monitoring center for collective use of systems for archiving, processing and analyzing satellite data, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2019, Vol. 16, No. 3, pp. 151–170 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-3-151-170.
6. Loupian E.A., Balashov I.V., Senko K.S. et al., An updated long-term series of data on fires on the territory of Russia according to MODIS collection 6, *Materialy 18-i Vserossiiskoi otkrytoi konferentsii "Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa"* (Proc. 18<sup>th</sup> All-Russia Open Conf. "Current Problems in Remote Sensing of the Earth from Space"), Moscow, IKI RAS, 16–20 Nov. 2020, p. 341 (in Russian), DOI: 10.21046/18DZZconf-2020a.
7. Loupian E.A., Stytsenko F.V., Senko K.S. et al., Burnt area assessment using MODIS collection 6 active fire data, *Sovremennye Problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2021, Vol. 18, No. 4, pp. 178–192 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-4-178-192.
8. Revich B.A., Shaposhnikov D.A., Pershagen G., New epidemiological model for assessment of the impact of extremely hot weather and air pollution on mortality (in case of the Moscow heat wave of 2010), *The Russian J. Preventive Medicine*, 2015, Vol. 18, No. 5, pp. 29–33 (in Russian).
9. Sirin A., Minayeva T., Vozbrannaya A., Bartalev S., How to avoid peat fires? *Science of Russia*, 2011, No. 2, pp. 13–21 (in Russian).
10. Sirin A.A., Maslov A.A., Valyaeva T.A. et al., Mapping of Peatlands in the Moscow Oblast Based on High Resolution Remote Sensing Data, *Contemporary Problems of Ecology*, 2014, Vol. 79, No. 7, pp. 809–815, DOI: 10.1134/S1995425514070117.
11. Sirin A.A., Medvedeva M.A., Makarov D.A. et al., Multispectral satellite based monitoring of land cover change and associated fire reduction after large-scale peatland rewetting following the 2010 peat fires in Moscow Region (Russia), *Ecological Engineering*, 2020, Vol. 158, Article 106044, DOI: 10.1016/j.ecoleng.2020.106044.
12. Sirin A., Medvedeva M., Korotkov V. et al., Addressing Peatland Rewetting in Russian Federation Climate Reporting, *Land*, 2021, Vol. 10, Article 1200, DOI: 10.3390/land10111200.
13. Sirin A.A., Medvedeva M.A., Itkin V.Yu. et al., Peat fire detection to estimate greenhouse gas emissions, *Meteorologiya i gidrologiya*, 2022, No. 10, pp. 33–45 (in Russian), DOI: 10.52002/0130-2906-2022-10-33-45.
14. Suslov V.I., Ibragimov N.M., Talysheva L.P., Tsyplakov A.A., *Econometrics: Textbook*, Novosibirsk: Publ. House SB RAS, 2005, 741 p. (in Russian).

15. *2013 Supplement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories: Wetlands. IPCC Methodology Report*, Hiraiishi T., Krug T., Tanabe K., Srivastava N., Baasansuren J., Fukuda M., Troxler T. G. (eds.), Switzerland: IPCC, 2014, 354 p., <https://www.ipcc.ch/publication/2013-supplement-to-the-2006-ipcc-guidelines-for-national-greenhouse-gas-inventories-wetlands/>.
16. *2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*, Calvo Buendia E., Tanabe K., Kranjc A., Baasansuren J., Fukuda M., Ngarize S., Osako A., Pyrozhenko Y., Shermanau P., Federici S. (eds.), Switzerland: IPCC, 2019, <https://www.ipcc.ch/report/2019-refinement-to-the-2006-ipcc-guidelines-for-national-greenhouse-gas-inventories/>.
17. *Assessment on peatlands, biodiversity and climate change*, Parish F., Sirin A., Charman D., Joosten H., Minayeva T., Silvius M., Stringer L. (eds.), Wageningen: Global Environment Centre, Kuala Lumpur and Wetlands Intern., 2008, 179 p.
18. Barriopedro D., Fischer E. M., Luterbacher J. et al., The hot summer of 2010: redrawing the temperature record map of Europe, *Science*, 2011, Vol. 332, Issue 6026, pp. 220–224, DOI: 10.1126/science.1201224.
19. Blain D., Row C., Alm J., Byrne K., Parish F., Duchemin É., Huttunen J. T., Tremblay A., Delmas R., Menezes C. F. S., Delmas R., Minayeva T., Pinguelli Rosa L. P., Sirin A., Vol. 4: Agriculture, forestry and other land use, *2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*, Eggleston H. S., Buendia L., Miwa K., Ngara T., Tanabe K. (eds.), Japan: IGES, 2006, Ch. 7: Wetlands, pp. 7.1–7.24.
20. Burke C., Wich S., Kusin K. et al., Thermal-Drones as a Safe and Reliable Method for Detecting Subterranean Peat Fires, *Drones*, 2019, Vol. 3, Issue 1, Article 23, DOI: 10.3390/drones3010023.
21. Cahyono B. K., Aditya T., Istarno, The Determination of Priority Areas for the Restoration of Degraded Tropical Peatland Using Hydrological, Topographical, and Remote Sensing Approaches, *Land*, 2022, Vol. 11, Issue 7, Article 1094, DOI: 10.3390/land11071094.
22. Freeborn P. H., Wooster M. J., Roy D. P., Cochrane M. A., Quantification of MODIS fire radiative power (FRP) measurement uncertainty for use in satellite-based active fire characterization and biomass burning estimation, *Geophysical Research Letters*, 2014, Vol. 41, Issue 6, pp. 1988–1994, DOI: 10.1002/2013GL059086.
23. Giglio L., Descloitres J., Justice C. O., Kaufman Y. J., An enhanced contextual fire detection algorithm for MODIS, *Remote Sensing of Environment*, 2003, Vol. 87, Issues 2–3, pp. 273–282.
24. Hu Y., Fernandez-Anez N., Smith T. E. L., Rein G., Review of emissions from smouldering peat fires and their contribution to regional haze episodes, *Intern. J. Wildland Fire*, 2018, Vol. 27, No. 5, pp. 293–312, DOI: 10.1071/WF17084.
25. Huang X., Rein G., Downward spread of smouldering peat fire: the role of moisture, density and oxygen supply, *Intern. J. Wildland Fire*, 2017, Vol. 26, No. 11, pp. 907–918, DOI: 10.1071/WF16198.
26. Jia G., Shevliakova E., Artaxo P., De Noblet-Ducoudré N., Houghton R., House J., Kitajima K., Lennard C., Popp A., Sirin A., Sukumar R., Verchot L., Land–climate interactions, In: *Climate Change and Land: an IPCC special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems*, Shukla P. R., Skea J., Calvo Buendia E., Masson-Delmotte V., Pörtner H.-O., Roberts D. C., Zhai P., Slade R., Connors S., van Diemen R., Ferrat M., Haughey E., Luz S., Neogi S., Pathak M., Petzold J., Portugal Pereira J., Vyas P., Huntley E., Kissick K., Belkacemi M., Malley J. (eds.), 2019, pp. 131–248, <https://www.ipcc.ch/srccl/>.
27. Joosten H., Sirin A., Couwenberg J. et al., The role of peatlands in climate regulation, In: *Peatland Restoration and Ecosystem Services: Science, Policy and Practice, Ecological Reviews*, Bonn A., Joosten H., Evans M., Stoneman R., Allott T. (eds.), Cambridge: Cambridge University Press, 2016, pp. 63–76, DOI: 10.1017/CBO9781139177788.005.
28. Kaufman Y. J., Justice C. O., Flynn L. P., Kendall J. D., Prins E. M., Giglio L., Ward D. E., Menzel W. P., Setzer A. W., Potential global fire monitoring from EOS-MODIS, *J. Geophysical Research*, 1998, Vol. 103, No. D24, pp. 32215–32238.
29. Konovalov I. B., Beekmann M., Kuznetsova I. N. et al., Atmospheric impacts of the 2010 Russian wild-fires: integrating modelling and measurements of an extreme air pollution episode in the Moscow region, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2011, Vol. 11, Issue 19, pp. 10031–10056, DOI: 10.5194/acp-11-10031-2011.
30. Leifeld J., Wüst-Galley C., Page S., Intact and managed peatland soils as a source and sink of GHGs from 1850 to 2100, *Nature Climate Change*, 2019, Vol. 9, Issue 12, pp. 945–947, DOI: 10.1038/s41558-019-0615-5.
31. Loisel J., Gallego-Sala A. V., Amesbury M. J. et al., Expert assessment of future vulnerability of the global peatland carbon sink, *Nature Climate Change*, 2021, Vol. 11, Issue 1, pp. 70–77, DOI: 10.1038/s41558-020-00944-0.
32. Marlier M. E., Liu T., Yu K. et al., Fires, smoke exposure, and public health: An integrative framework to maximize health benefits from peatland restoration, *GeoHealth*, 2019, Vol. 3, Issue 7, pp. 178–189, DOI: 10.1029/2019GH000191.

33. Minayeva T., Sirin A., Stracher G. B., The Peat Fires of Russia, In: *Coal and Peat Fires: A Global Perspective. Vol. 2: Photographs and Multimedia Tours*, Stracher G. B., Prakash A. Sokol E. V. (eds.), Amsterdam: Elsevier, 2013, pp. 375–394.
34. Nelson K., Chasme L., Hopkinso C., Quantifying Lidar Elevation Accuracy: Parameterization and Wavelength Selection for Optimal Ground Classifications Based on Time since Fire/Disturbance, *Remote Sensing*, 2022, Vol. 14, Article 5080, DOI: 10.3390/rs14205080.
35. Page S. E., Siegert F., Rieley J. O. et al., The amount of carbon released from peat and forest fires in Indonesia during 1997, *Nature*, 2002, Vol. 420, No. 6911, pp. 61–65, DOI: 10.1038/nature01131.
36. Page S. E., Rieley J. O., Banks C. J., Global and regional importance of the tropical peatland carbon pool, *Global Change Biology*, 2011, Vol. 17, Issue 2, pp. 798–818, DOI: 10.1111/j.1365-2486.2010.02279.x.
37. Poulter B., Christensen Jr. N. L., Halpin P. N., Carbon emissions from a temperate peat fire and its relevance to interannual variability of trace atmospheric greenhouse gases, *J. Geophysical Research: Atmospheres*, 2006, Vol. 111, Article D06301, DOI: 10.1029/2005JD006455.
38. Prasetyo L. B., Setiawan Y., Condro A. A. et al., Assessing Sumatran Peat Vulnerability to Fire under Various Condition of ENSO Phases Using Machine Learning Approaches, *Forests*, 2022, Vol. 13, Issue 6, Article 828, DOI: 10.3390/f13060828.
39. Rein G., Smouldering fires and natural fuels, In: *Fire phenomena and the earth system: An interdisciplinary guide to fire science*, Belcher C. M. (ed.), New York: John Wiley and Sons Limited, 2013, pp. 15–34, DOI: 10.1002/9781118529539.
40. Rein G., Huang X., Smouldering Wildfires in Peatlands, Forests and the Arctic: Challenges and Perspectives, *Current Opinion in Environmental Science and Health*, 2021, Vol. 24, Article 100296, DOI: 10.1016/j.coesh.2021.100296.
41. Rossi S., Tubiello F. N., Prosperi P. et al., FAOSTAT estimates of greenhouse gas emissions from biomass and peat fires, *Climatic Change*, 2016, Vol. 135, Issue 3–4, pp. 699–711, DOI: 10.1007/s10584-015-1584-y.
42. Safronov A. N., Fokeeva E. V., Rakitin V. S. et al., Severe Wildfires Near Moscow, Russia in 2010: Modeling of Carbon Monoxide Pollution and Comparisons with Observations, *Remote Sensing*, 2015, Vol. 7, Issue 1, pp. 395–429, DOI: 10.3390/rs70100395.
43. Schulte M. L., McLaughlin D. L., Wurster F. C. et al., Short- and long-term hydrologic controls on smouldering fire in wetland soils, *Intern. J. Wildland Fire*, 2019, Vol. 28, No. 3, pp. 177–186, DOI: 10.1071/WF18086.
44. Sirin A., Maslov A., Makarov D. et al., Assessing Wood and Soil Carbon Losses from a Forest-Peat Fire in the Boreo-Nemoral Zone, *Forests*, 2021, Vol. 12, Issue 7, Article 880, DOI: 10.3390/f12070880.
45. Sirin A., Medvedeva M., Remote Sensing Mapping of Peat-Fire-Burnt Areas: Identification among Other Wildfires, *Remote Sensing*, 2022, Vol. 14, Article 194, DOI: 10.3390/rs14010194.
46. Sirin A., Minayeva T., Yurkovskaya T. et al., Russian Federation (European Part), In: *Mires and Peatlands of Europe: Status, Distribution and Conservation*, Joosten H., Tanneberger F., Moen A. (eds.), Stuttgart: Schweizerbart Science Publishers, 2017, pp. 589–616, DOI: 10.1127/mireseurope/2017/0001-0049.
47. Tanneberger F., Tegetmeyer C., Busse S. et al., The peatland map of Europe, *Mires Peat*, 2017, Vol. 19, Article 22, <https://doi.org/10.19189/MaPP.2016.OMB.264>.
48. Turetsky M. R., Benscoter B., Page S. et al., Global vulnerability of peatlands to fire and carbon loss, *Nature Geoscience*, 2015, Vol. 8, No. 1, pp. 11–14, DOI: 10.1038/ngeo2325.
49. Usup A., Hayasaka H., Peatland Fire Weather Conditions in Central Kalimantan, Indonesia, *Fire*, 2023, Vol. 6, Issue 5, Article 182, DOI: 10.3390/fire6050182.
50. Yuan H., Restuccia F., Rein G., Spontaneous ignition of soils: a multi-step reaction scheme to simulate self-heating ignition of smouldering peat fires, *Intern. J. Wildland Fire*, 2021, Vol. 30, No. 6, pp. 440–453, DOI: 10.1071/WF19128.