

ОЦЕНКА ПОЖАРНОЙ ОПАСНОСТИ ОСУШЕННЫХ БОЛОТ С ПОМОЩЬЮ РЕТРОСПЕКТИВНОГО АНАЛИЗА ПОЖАРОВ ПРОШЛЫХ ЛЕТ ПО ДАННЫМ КОСМИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА

Г.В. Куксин¹, С.В. Залесов^{2✉}, Л.А. Крючкова¹, Ю.Э. Зенкевич¹

¹АНО «Центр профилактики ландшафтных пожаров» (АНО «ЦПП»), Россия, 127591, Москва, ул. Дубнинская, д. 26, корп. 4, кв. 127

²ФГБОУ ВО «Уральский государственный лесотехнический университет (УГЛТУ)», Россия, 620100, г. Екатеринбург, ул. Сибирский тракт, д. 37

Zalesovsv@m.usfeu.ru

Рассмотрены способы оценки пожарной опасности осушенных торфяных болот по данным космического мониторинга. Предложен набор критериев, позволяющих анализировать степень пожарной опасности осушенных торфяников на основе ретроспективных данных спутникового мониторинга. Выделен наиболее важный критерий — «сумма термоточек за весь период наблюдений». Предложены дополнительные критерии для ранжирования (сортировки) осушенных торфяных болот по их пожарной опасности. Разработаны веб-инструмент и общедоступная база данных для анализа термоточек в контурах большинства российских осушенных болот с разделением термоточек по годам, сезонам, данным от разных спутников. Для планирования и реализации проектов по профилактике торфяных пожаров рекомендуется на основании указанных параметров в сочетании с другими факторами (плотностью населения, близостью городов) осуществлять выбор наиболее горимых и сложных в тушении, причиняющих большой ущерб в случае пожара торфяников.

Ключевые слова: торфяной пожар, термоточки, MODIS, VIIRS, космические снимки Sentinel-2, пожарная опасность торфяных болот, сумма термоточек

Ссылка для цитирования: Куксин Г.В., Залесов С.В., Крючкова Л.А., Зенкевич Ю.Э. Оценка пожарной опасности осушенных болот с помощью ретроспективного анализа пожаров прошлых лет по данным космического мониторинга // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2026. Т. 30. № 4. С. 5–19. DOI: 10.17816/2542-1468-2026-4-5-19

Одним из видов природных пожаров являются почвенные или торфяные. Несмотря на медленное продвижение кромки этих пожаров, их ликвидация связана со значительными трудностями, а вред, причиняемый окружающей среде, нередко превышает таковой от низовых пожаров [1–5]. В связи с изменениями климата в сторону повышения температуры воздуха и уменьшения количества осадков потенциальная опасность развития торфяных пожаров будет возрастать [6]. Особенно опасны торфяные пожары на осушенных болотах, нередко повторяющиеся [7–10]. На одних и тех же болотах вследствие повторяющихся пожаров формируется опасное задымление и происходят парниковые выбросы, дающие начало новым низовым и верховым пожарам, длительное время сковывающим силы пожарных подразделений. При этом в России в настоящее время нет нормативно закреплённого способа и разработанных методик определения пожарной опасности таких болот.

Для торфяников, которые отнесены к землям лесного фонда, пожарная опасность определяется только как природная пожарная опасность произрастающих на них лесов. В соответствии с приказом Рослесхоза такие участки могут быть отнесены к наиболее низким классам (4 и 5) природной пожарной опасности, где возникновение пожара возможно только при особо неблагоприятных условиях, в частности при длительной засухе, или в периоды пожарных максимумов в травяных типах леса [11]. Такое описание пожарной опасности явно не отражает особенности торфяных почв и не учитывает риск развития торфяных пожаров, способных действовать длительное время, давать начало новым низовым и верховым пожарам и приводить к полной гибели всего древостоя.

Кроме того, многие болота находятся не на землях лесного фонда и для них не существует способа оценки природной пожарной опасности, нет соответствующих нормативных правовых актов, нет разработанных для них мер противопожарного обустройства, способов предупреждения и тушения пожаров [12].

Отсутствие утвержденных методик определения пожарной опасности, методик оценки успешности снижения пожарной опасности торфяных болот приводит к тому, что решения по профилактике пожаров для таких мест принимаются обычно «индивидуально» по отдельным болотам на региональном или местном уровне и обычно только после резонансных пожаров, а результативность принимаемых мер не может быть объективно оценена, что препятствует финансированию.

Все это приводит к неполному или необъективному учету торфяных пожаров, а системные меры, направленные на их предупреждение, принимаются в недостаточном объеме. Несмотря на наличие объективных данных о развитии торфяных пожаров и разработанных способов их эффективного тушения [13–16], данные пожары нередко уходят в зиму непотушенными. В условиях изменяющегося климата это создает риски возникновения крупных и затяжных торфяных пожаров.

Цель работы

Цель работы — выработка способа анализа пожарной опасности для российских осушенных торфяников, основанного на ретроспективных данных спутникового мониторинга, в том числе способа предварительного определения (ранжирования) наиболее пожароопасных болот в отдельно взятом регионе или районе.

Анализ литературных источников. Проблему отсутствия единой базы данных о пожароопасных торфяниках в разные годы пытались решить в рамках научных и природоохранных проектов как в России, так и за рубежом. Развитие методов дистанционного зондирования Земли в сочетании с повышением интереса к торфяникам в свете борьбы с изменениями климата привело к появлению различных способов цифрового картирования торфяных почв [17].

В 2011 г. после резонансных торфяных пожаров 2010 г. в Центральной России и в Поволжье на основе геоинформационной системы «Болотные экосистемы России», разработанной в Институте лесоведения РАН, и с использованием Карты лесов России (2004 г.) была дана оценка площадям лесного покрова на торфяниках (139 млн га) и заболоченных мелкозалежных торфяных угодьях (230 млн га) [18]. В рамках этой работы определено, что деревья занимают 38 % площади торфяников, из которых более половины (21 %) приходится на редколесья. Леса (болотные леса) занимают 17 % площади (24 млн га). При этом большинство торфяников (более 62 %) являются открытыми

(безлесными) пространствами. Более половины заболоченных мелкозалежных торфяных местообитаний также представляют собой открытые пространства, а остальные (23 и 24 %) — примерно поровну распределены между лесными и редколесными типами.

В 2014 г. была собрана разнообразная отраслевая информация (из доступных материалов обследований торфяных залежей, лесных инвентаризаций, топографических и других тематических карт) в одну согласованную географическую информационную систему с более чем 1700 отдельными торфяниками (площадью от 2,5 до 26 000 га), географически привязанными к использованию спутниковых снимков высокого разрешения [19].

Для осушенных и вторично заболачиваемых торфяников был разработан подход с выделением на основе спутниковых данных участков (страт) с одинаковой растительностью и уровнем грунтовых вод, позволяющий отчасти оценивать пожарную опасность и ее снижение, а также отчасти оценивать вероятность возникновения повторных пожаров [20].

Похожий подход с подробным анализом растительности и отрисовкой контуров различных участков с однотипной растительностью страт GEST- (Greenhouse Gas Emission Sites Types), прежде всего направленный на определение однородных по выбросам парниковых газов, был применен при картировании торфяников в Калининградской области [21] и для болот в странах Прибалтики [22].

В мировой практике картирование торфяников проводилось для Европы как географического региона путем объединения баз данных по отдельным странам в рамках единой геоинформационной системы с сохранением картографического масштаба исходных данных [23]. В 2020 г. Продовольственная и сельскохозяйственная организация Объединенных Наций (ФАО) опубликовала сборник практических рекомендаций по методикам картирования и мониторинга торфяников, основанных на опыте «торфяных» стран как с тропическими климатическими условиями (Индонезия, Демократическая Республика Конго, Перу), так и с умеренным климатом (Великобритания) [24].

Машинное обучение для картирования торфяников и их состояния применяют не только по космическим данным, но и по данным аэрофотосъемки, например, в Шотландии [25]. В Великобритании, кроме того, применялись данные лидарной и мультиспектральной съемки [26].

В 2022 г. появилась международная (глобальная) карта торфяников, созданная на основе машинного обучения с применением многих

национальных карт и информационных продуктов [27]. К сожалению, недостаточная точность и степень детализации такой карты не позволяют использовать ее для оценки состояния торфяников, запасов торфа и пожарной опасности конкретных месторождений торфа в России.

Наиболее масштабным и наиболее точным проектом по созданию карты осушенных пожароопасных болот России стал проект, инициированный природоохранными общественными организациями в 2011 г., с элементами широкого вовлечения квалифицированных волонтеров (citizen science), который позволил в течение нескольких лет (к 2014 г.) по данным спутниковых снимков высокого пространственного разрешения создать векторный слой границ осушенных болот для большинства российских регионов. Созданная на его основе веб-карта [28] позволяла не только определять границы осушенных болот, но и отслеживать термоточки, попавшие в границы контуров таких торфяников. Впоследствии этот проект был возглавлен АНО «ЦПЛП» и лег в основу дальнейшего исследования.

Использование данных о термических аномалиях для оценки частоты торфяных пожаров, а также для определения мест возникновения таких пожаров практикуют многие исследователи не только бореальных, но и тропических торфяных пожаров, например на о. Калимантан в Индонезии [29].

Для низкотемпературных (торфяных) пожаров на о. Борнео также с сезона 2015 г. помимо термоточек MODIS и VIIRS применяли для анализа спутниковые снимки среднего пространственного разрешения (160 м/пиксель) TET-1 для уточнения границ пожаров и для более точного определения их начальных точек [30]. Площади пожаров определяют по выгоревшим территориям с использованием различных индексов изменения растительного покрова в различных странах и регионах. Для разных задач могут быть применены различные комбинации каналов спутниковых снимков [31, 32].

Для России наибольший проект по отрисовке пожаров по данным спутниковых снимков среднего пространственного разрешения с массовым вовлечением квалифицированных волонтеров [33] позволил не только создать карту всех пожаров 2020 г. на всех категориях земель, но и дал большой набор данных, которые затем были использованы для машинного обучения и создания карты с автоматической отрисовкой контуров пожаров по снимкам Sentinel-2 и с использованием термоточек MODIS, на которой можно выделить контуры осушенных болот и анализировать данные о пожарах на торфяниках [34].

Оперативное выявление торфяных пожаров без открытого горения по данным дистанционного зондирования Земли остается сложной задачей, особенно если это касается длительно действующих пожаров. Очень сложны в обнаружении пожары, действующие в зимний период в том числе в зоне вечной или многолетней мерзлоты. Такие пожары зимой очень сложно определить по космическим снимкам [35]. Обнаружение указанных пожаров и прогнозирование их дальнейшего развития является сложной и очень важной задачей.

Возможность кластеризации и оценки пожарной опасности каких-то отдельных территорий по базам данных термоточек и по пространственно-временному их распределению неоднократно использовалась исследователями для анализа в разных странах. Термоточки MODIS за период с 2001 по 2017 гг. использовались для такого анализа на глобальном уровне [36], в частности для Северной Америки [37]. Кластеризация термоточек помогала выделить наиболее пожароопасные охраняемые территории в Кении [38] и Марокко [39].

Материалы и методы

Методика оценки пожарной опасности осушенных болот. В настоящем исследовании «проблемными» или «наиболее пожароопасными» называются осушенные торфяники, которые имеют следующие характеристики:

- пожары происходят относительно часто (период повторяемости менее 10 лет);
- при пожарах выгорают открытым огнем обширные площади по поверхности болот;
- формируются многочисленные очаги тления торфа;
- происходит гибель имеющегося древостоя;
- устанавливается длительное задымление прилегающих территорий.

Пожары на торфяных болотах, отвечающих описанным критериям, часто становятся причиной введения режимов чрезвычайной ситуации, становятся причиной опасного задымления в населенных пунктах и могут вызвать рост избыточной смертности среди населения, вынуждают формировать на длительное время крупные группировки сил пожарной охраны и лесопожарных организаций, что приводит к дефициту сил на других пожароопасных территориях, и нехватке сил и средств на других действующих пожарах.

Особенности использования термоточек для ретроспективного анализа торфяных пожаров. Необходимо учитывать, что небольшие и низкотемпературные пожары могут не давать

термоточку, а скоротечные травяные и беглые низовые пожары могут произойти и погаснуть между пролетами спутника и также не дать термоточку, хотя последствием такого быстрого открытого горения могло стать воспламенение и дальнейшее тление торфа. Расположенные рядом термоточки могут быть как несколькими отдельными пожарами, возникшими в одно время, так и признаками одного крупного пожара, кромки которого дают отдельные термоточки, т. е. количество термоточек можно интерпретировать как интегральный показатель горимости, отражающий масштабы воздействия огня на поверхность болота. Однако этот показатель не позволяет точно оценивать число пожаров или их площадь. При необходимости уточнить пройденную огнем площадь, определить начальную точку пожара или оценить, это один крупный пожар или несколько отдельных небольших пожаров, помимо термоточек следует использовать данные спутниковых снимков среднего и высокого пространственного разрешения в различных комбинациях каналов.

Критерии пожарной опасности осушенного болота. В качестве основного интегрального признака горимости, который отражает общее число пожаров, их регулярность и сложность, а также опасность развития крупных пожаров, выбрана сумма термоточек (СТ), определяемая как сумма всех термоточек, зарегистрированных в границах отдельного болота за всю историю наблюдений. Данный показатель учитывает обобщенные данные об объемах горения на поверхности болота в течение длительного времени, а также отчасти отражает пространственные характеристики болота, поскольку более крупные осушенные торфяники представляют опасность развития еще более сложных и затяжных пожаров.

В процессе работы было учтено, что пожары в летне-осеннее время обычно дают большие выбросы дыма и парниковых газов с единицы площади. Для выбора критериев, отражающих степень пожарной опасности, важное значение имеет оценка корреляции СТ и суммы летне-осенних термоточек, для того чтобы оценить, насколько велика доля болот, на которых частые крупные весенние выжигания не приводят к торфяным пожарам, развивающимся затем летом. Если бы доля таких болот была велика, коэффициент корреляции СТ и суммы летне-осенних термоточек оказался бы небольшим, и в качестве ключевого критерия пришлось бы использовать сумму летне-осенних термоточек.

Анализ ретроспективных данных спутникового мониторинга показал, что между СТ и суммой всех термоточек в летне-осенний

период (с июня по декабрь) для всех болот, где регистрировались термоточки MODIS (3349 контуров болот), существует положительная корреляция с коэффициентом $r = 0,93$. Таким образом, выделение наиболее пожароопасных болот по максимальному значению СТ позволяет выявить и наиболее горимые в летне-осенний период болота.

Важно не упустить из внимания торфяники, на которых благодаря эффективной работе пожарных служб, высокому уровню грунтовых вод или по иным причинам в исследуемый период весенние пожары по поверхности не давали опасного развития торфяных пожаров, но в будущем могут давать. В связи с этим основным критерием пожарной опасности нами принята сумма всех термоточек.

Для комплексного анализа пожарной опасности осушенного болота на основе ретроспективных данных важно учитывать следующие критерии (метод СТ+):

1. Повторяемость пожаров.

Критерий отражает не число термоточек (косвенный показатель сложности пожаров и пройденной огнем площади), а факт того, что детектируемые спутниками пожары с открытым горением происходили с определенной периодичностью. Таким образом определяется закономерность частоты пожаров на болоте, в то время как погодные условия и отсутствие раннего реагирования позволяют пожарам развиваться до детектируемых спутником размеров и интенсивности.

2. Максимальное значение количества термоточек в год.

Критерий отражает, до каких масштабов разгорались пожары в прошлом, если их не удавалось вовремя остановить, насколько в экстремальные годы могло не хватать сил и средств для сдерживания пожара. Это отражает природные и технические характеристики объекта (запасы осушенного торфа, дефицит воды для тушения, нарушение сети дорог), а также возможный дефицит сил, средств, квалифицированных кадров в конкретном регионе или районе. При этом важно учитывать, что после таких катастрофических эпизодов торфяник часто становится еще более опасным вследствие окончательного разрушения инфраструктуры: прогорают насыпи узкоколейных дорог, гидросистема в результате образования сгоревших бортов каналов перестает работать в плановом режиме, завалы из упавших деревьев и прорастающий через них подрост изменяют проходимость обширных участков местности.

3. Плотность термоточек на квадратный километр.

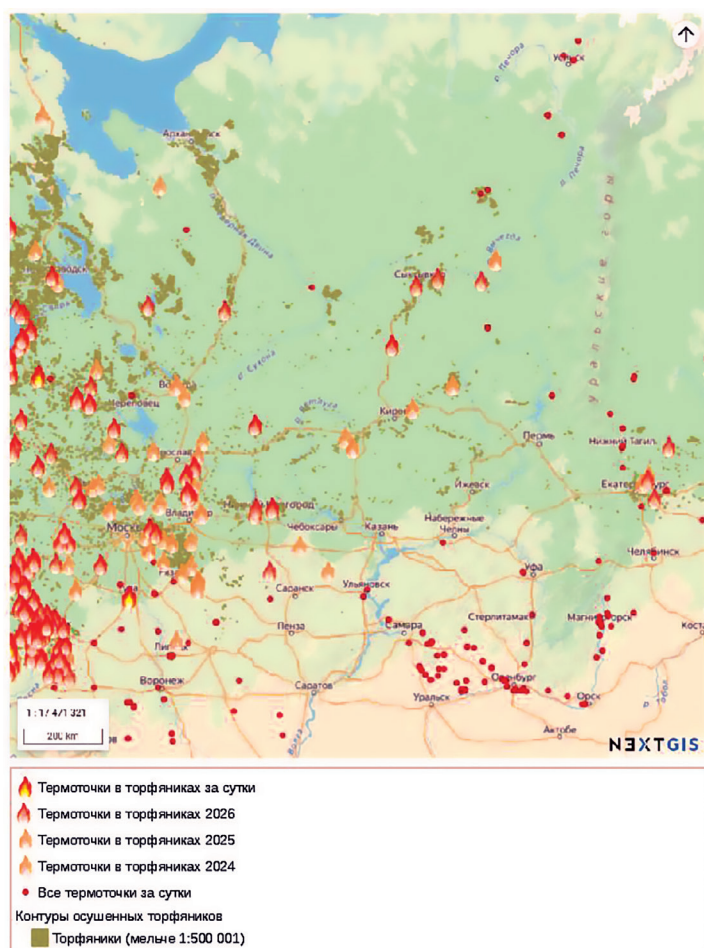


Рис. 1. Места расположения термоточек в границах осушенного торфяника, атрибутивная информация о торфянике и график термоточек

Fig. 1. Hotspot locations within the boundaries of a drained peatland, attribute information about the peatland, and a hotspots graph

Критерий косвенно отражает, насколько равномерно распределены пожароопасные участки. При его высоких значениях можно предположить, что опасность представляет, скорее, вся площадь торфяника, при низких — следует искать места, где возникновение и развитие пожаров наиболее вероятно. Мы предполагаем, что при ранжировании болот для отдельно взятого региона этот критерий может помочь в отборе болот, требующих дополнительного анализа пространственного распределения термоточек.

4. Отношение количества весенних термоточек к количеству всех выявленных термоточек.

Критерий отражает вероятность перехода весенних пожаров с открытым горением в летние и осенние торфяные пожары с вторичным открытым горением или большими площадями тлеющего торфа. Если доля весенних термоточек составляет единицу, можно делать вывод о том, что весенние выжигания не приводят

к обширным летним и осенним пожарам. Если значение близко к нулю, можно предположить, что болото может не иметь характерных переходов весенних пожаров в летние, а летние пожары возникают по иным причинам (например, от костров и окурков уже летом или осенью). Наличие по этому критерию и весенних, и летних пожаров позволяет предположить их взаимосвязь и требует дальнейшей проверки пространственного совпадения соответствующих таким пожарам термоточек.

5. Медианные значения годового количества термоточек.

Критерий имеет значимый коэффициент корреляции с СТ ($r = 0,73$ для всех болот, на которых в период с 2002 по 2024 гг. регистрировалась хотя бы одна термоточка MODIS). Показатель представляется важным прежде всего для оценки изменения пожарной опасности с помощью сравнения медианных значений

годового количества термоточек для различных временных периодов. Многие проанализированные крупные и проблемные осушенные торфяники имеют явную закономерность в том, с какой периодичностью, в каких местах и примерно в каких объемах на них происходят пожары. При этом нет сомнения, что на развитие пожаров во многом влияют погода в конкретный сезон и различные социально-экономические факторы. В частности, масштаб пожаров в 2002 г. можно объяснить не только экстремальной жарой и засухой, но и следствием неудачных реформ в лесном хозяйстве и пожарной охране. Для многих территорий и временных периодов оценить такие факторы ретроспективно не всегда есть возможность. Экстремальные выбросы значений числа термоточек в отдельные годы создают ситуацию, при которой учет средних статистических значений приводит к завышению среднего, и на него не вполне корректно ориентироваться как на индикатор в проектах по снижению пожарной опасности. Использование моды (или нескольких мод) также не позволяет корректно оценивать изменение горимости: редкие годы с обычным числом термоточек дадут те же показатели, что и ежегодные пожары. Нам представляется, что медианное значение термоточек может быть стабильным и при этом вполне консервативным показателем, по которому можно корректно сравнивать различные временные отрезки. Например, медианное значение числа термоточек до 2010 г. и после него, до начала противопожарного проекта и после его реализации.

6. Пространственное пересечение (совпадение или примыкание) весенних и осенних термоточек в пределах их пространственной погрешности в определении) внутри одного года и пространственное пересечение осенних термоточек предыдущего года с весенними точками последующего годов, а также случаи последовательной регистрации термоточек в одних и тех же местах в течение нескольких лет.

Эти признаки позволяют высказать предположение о наличии в таких местах длительных (транссезонных) пожаров, в том числе переходящих через зиму в следующий год.

Последовательное применение критериев СТ+ после выявления первоначального списка с наиболее высокими показателями СТ для торфяников позволяет составлять списки наиболее пожароопасных болот для регионов.

Веб-инструмент для анализа термоточек в границах осушенных болот. На российской платформе для веб-картографии NextGIS с применением программного обеспечения QGIS

создан веб-ресурс «Пожарная опасность осушенных торфяных болот» (рис. 1), позволяющий визуализировать контуры осушенных болот и историю всех давших термоточки пожаров для каждого контура за все годы наблюдений с возможностью выделить в виде отдельных слоев термоточки по годам, сезонам, источникам данных. Для каждого контура осушенного болота приведена атрибутивная информация, а для торфяников с зарегистрированными термоточками автоматически рассчитываются ключевые статистические показатели пожарной опасности. У любого пользователя есть возможность скачать накопленные данные о термоточках для всех осушенных торфяников.

В работе использован ранее созданный природоохранными организациями и доработанный экспертами АНО «ЦПЛП» слой осушенных болот, полигоны которого отрисованы с помощью визуально-экспертного дешифрирования космических снимков высокого и сверхвысокого пространственного разрешения, используемых на общедоступных картографических сервисах (рис. 2). Характерными признаками осушенных торфяных болот в данном случае считались следующие:

- каналы осушительной сети, созданные для фрезерной добычи торфа с характерными расстояниями между картовыми каналами (20 м — для верховых болот, 40 м — для низинных болот), а также расстояние 500 м между валовыми каналами;

- вытянутые параллельные карьеры бывшей элеваторной (машинно-формовочной) добычи торфа с расстояниями между бровками таких карьеров около 5 м;

- бывшие карьеры гидродобычи торфа, имеющие характерные размеры (около 140...200 м в длину и 30...50 м в ширину) и повторяющиеся формы как с вторичным зарастанием сплавиной, так и без зарастания и с образованием более крупных водоемов при размыве бровок между карьерами водой;

- сети осушительных каналов, выкопанные для нужд лесной мелиорации с характерными расстояниями между ними и с признаками заболоченной местности по снимкам;

- сети осушительных каналов, выкопанные для нужд сельскохозяйственной мелиорации с характерными расстояниями между ними и с признаками заболоченной местности по снимкам.

Способ картирования осушенных торфяников, основанный на экспертном дешифрировании высокодетальных космических снимков, не учитывает, что в некоторых случаях верхний слой почвы настолько деградировал в результате окисления воздухом или преобразован



Рис. 2. Полигон (контур осушенного болота) с признаками фрезерной добычи на низинном торфянике с термоточками в контуре

Fig. 2. An example of a polygon (contour of a drained peatland) with signs of milling in a low-moor peatland with hotspots in the contour

интенсивной хозяйственной деятельностью, что перестал содержать более 50 % органического вещества по массе, т. е. не может считаться торфяной почвой. Это характерно скорее для болот, ранее осушенных для нужд сельского хозяйства (оросительно-осушительные системы). Таким образом, часть выделенных на карте полигонов может обозначать участки, где ранее был торф и могла быть высокая пожарная опасность, но в последние годы (или даже десятилетия) эти участки не дают почвенных пожаров.

Наоборот, в некоторых случаях болота могли оказаться в осушенном (пожароопасном) состоянии, но не иметь перечисленных выше признаков (каналов, карьеров), по которым их можно было бы отнести к осушенным торфяникам. Это может касаться пойменных болот на берегах обмелевших рек, болот, осушенных в результате нарушения гидрорежима при строительстве автодорог, подземном водозаборе и т. п. Такие пожароопасные болота могли не попадать в слой осушенных торфяников и не учитываться в дальнейшем анализе, хотя в отдельных случаях их контуры формировались по данным с действующих торфяных пожаров.

Важное значение имеет учет возможных неточностей и пропусков отдельных торфяников по причине отсутствия на момент картирования высокодетальных снимков этих территорий в векторном слое контуров осушенных болот.

Источником данных о тепловых аномалиях, выявленных инфракрасными радиометрами MODIS и VIIRS с 2002 по 2024 гг. является сайт международной системы мониторинга пожаров FIRMS. Данные в виде таблицы Excel отсорти-

рованы по годам, внутри каждого года — по сезонам «зима — весна» (январь — май) и «лето — осень» (июнь — декабрь), а также спутниковым приборам, обнаружившим термоточку.

Термоточки MODIS и VIIRS имеют разные возможные погрешности определения координат места пожара вследствие различного пространственного разрешения этих приборов. Для того чтобы не пропустить термоточки, которые могут выявлять признаки пожара на болоте, но по причине погрешности не попали в контур осушенного болота, термоточки в буферной зоне 1 км вокруг торфяника также считаются затронутыми осушенное болото. В некоторых случаях это создаст ложное представление о том, что пожар был именно на территории болота.

Проверка практического применения метода оценки пожарной опасности осушенных торфяников по ретроспективным дистанционным данным. В целях проверки эффективности практического применения критериев СТ+ для принятия управленческих решений проведен сравнительный анализ результатов отбора осушенных торфяников по критериям СТ+ и результатов экспертного отбора. Было выбрано шесть регионов из различных природно-климатических зон, отличающихся региональными особенностями организации реагирования на торфяные пожары и типами преобладающего способа осушения и добычи торфа: 1) Смоленская область (большие площади осушения под фрезерную добычу торфа, а также для нужд сельского хозяйства); 2) Ленинградская область (большие площади добычи гидроспособом

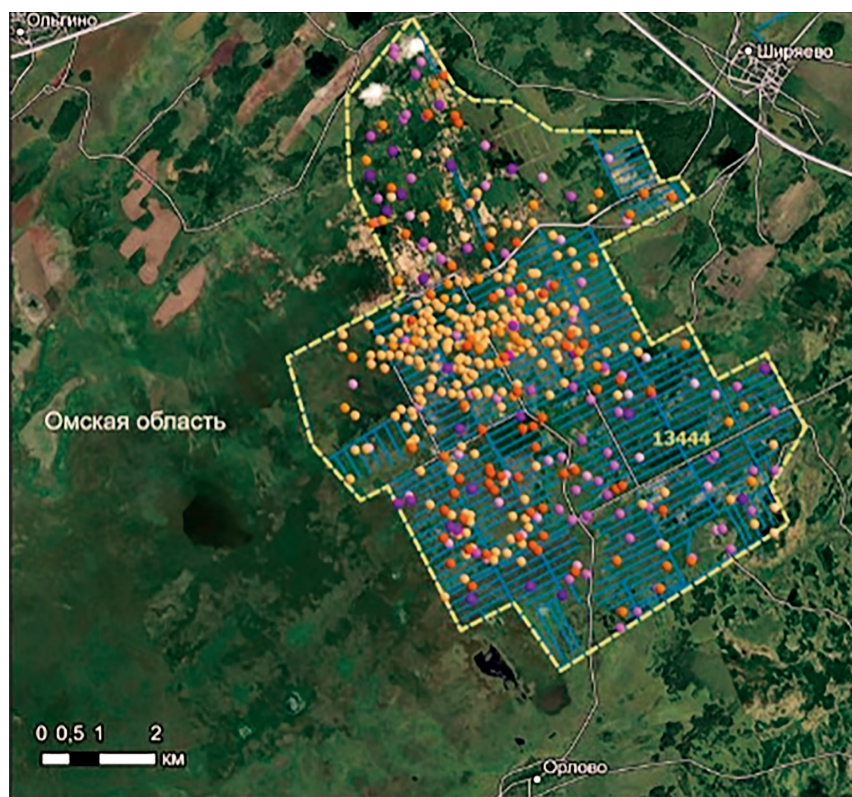


Рис. 3. Пример наиболее пожароопасного болота, отобранного как экспертом, так и по методу СТ+ у д. Орлово Крутинского района Омской области. На карте отражены все термоточки с 2002 г.

Fig. 3. An example of the most fire-hazardous peatland, selected both by an expert and using the SH+ method, near the village of Orlovo, Krutinsky district, the Omsk region. The map shows all thermal spots since 2002

и фрезерным способом); 3) Свердловская область (значительные площади машинно-формовочной и фрезерной добычи); 4) Новосибирская область; 5) Омская область; 6) Республика Бурятия. В последних трех регионах преобладает осушение для нужд сельского хозяйства.

Экспертам в области лесной и пожарной охраны с опытом полевой и управленческой работы на торфяных пожарах в течение 2010–2020 гг. в каждом регионе предложили отобрать наиболее пожароопасные торфяные болота на территории «своего» региона, руководствуясь следующими критериями:

- наибольшей вероятностью возникновения торфяного пожара в ближайший засушливый год;

- наибольшей вероятностью длительного развития торфяного пожара в случае его возникновения;

- наибольшим вероятным ущербом от торфяного пожара для населения и экономики.

В результате список Смоленской области состоял из семи пунктов, Омской области и Республики Бурятии — из трех пунктов каждый,

Новосибирской области — из пяти пунктов, Свердловской и Ленинградской областей — из 10 пунктов каждый.

Полученные списки наиболее пожароопасных (проблемных) болот сравнивались с аналогичными рейтингами, отсортированными по автоматически рассчитываемым показателям СТ+. Для этого по каждому из перечисленных регионов отбирались 20 торфяников с наибольшими значениями СТ с последующим сокращением списка до 10 с учетом дополнительных параметров СТ+.

Результаты сравнения показали, что для всех регионов первые позиции в списках наиболее пожароопасных торфяников по оценке экспертов совпали с первыми позициями в списках, составленных по данным автоматического ранжирования по методу СТ+. Пример наиболее пожароопасного болота, отобранного как экспертом, так и по методу СТ+ у д. Орлово Крутинского района Омской области (рис. 3, 4). Сумма термоточек 2002–2024 составляет для данного торфяника 475 шт., рейтинг по региону по сумме термоточек — первый. Максимальное

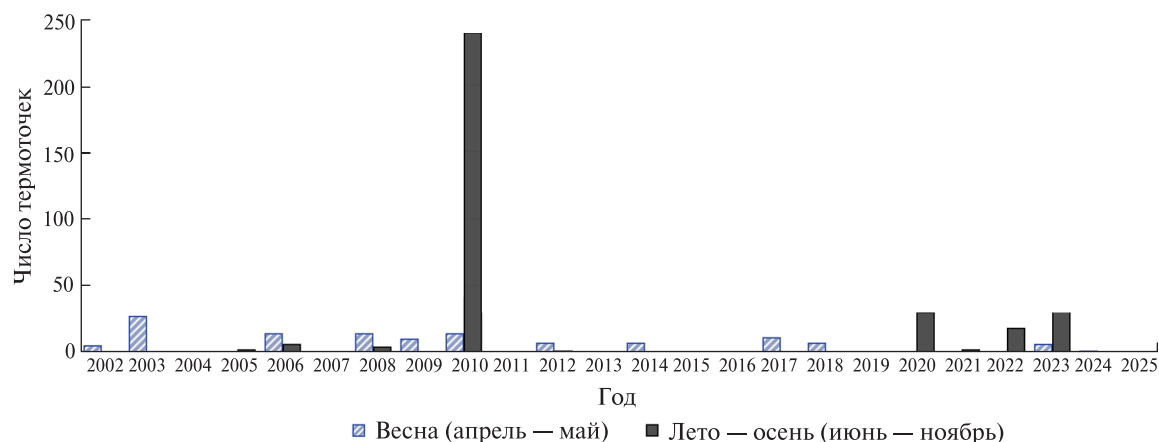


Рис. 4. Распределение термоточек, выявленных в границах осушенного торфяника у д. Орлово Крутинского района Омской области по годам и сезонам

Fig. 4. Distribution of hotspots identified within the boundaries of a drained peatland near the village of Orlovo, Krutinsky District, the Omsk Region, by year and season

Показатели пожарной опасности по методу СТ+ отобранных экспертом пожароопасных торфяников Смоленской области

Fire hazard indicators according to the CT+ method of fire-hazardous peatlands of the Smolensk region selected by an expert

Описание от эксперта	ID номер по слою	Сумма термоточек 2002–2024 гг.	Повторяемость пожаров	Максимальное число термоточек в год	Плотность термоточек	Отношение весенних термоточек к общему числу
д. Свиты, Духовщинский район	8916	146	Каждый год	56	3,05	0,64
д. Романы, Велижский район	5136	9	2 раза за 22 года (2015)	8	1,14	0
д. Корсики, Ершицкий район	3644	1	1 раз за 22 года (2015)	1	0,38	1
ж/д станция Сошно, Духовщинский район	12 603	23	5 раз (сильный пожар в 2015 г., небольшой в 2024 г.)	15	3,91	0,04
д. Чистик, Руднянский район	8911	156	9 раз (раз в 2–3 года), сильно в 2002 г., 2010 г., пожары в 2015 г., 2009 г.	122	7,32	0,06

число термоточек в год составляет 253 (2010), медианное значение числа термоточек в год составляет 10, средняя плотность термоточек на квадратный километр составляет 9,48 при средней плотности термоточек на квадратный километр по региону 2,7, количество лет с выявленными пространственно близкими термоточками летом и весной следующего года равно двум (2006 и 2010), количество эпизодов с выявлением пространственно близких термоточек летом предыдущего года с весной последующего года равно трем (2009/2010, 2022/2023,

2023/2024), средний период повторяемости пожаров в границах осушенного торфяника равен одному году (ежегодные пожары).

Среди более низких позиций в списках эксперты в Смоленской, Свердловской и Новосибирской областях называли торфяники, которые, согласно ретроспективным данным, горели меньше других, но где пожары происходили в последние годы (т. е. запомнившиеся по недавно организованным действиям по тушению). Выбор экспертов в том числе был обусловлен тем, в какой службе они работали

и за какие категории земель отвечали в первую очередь. В частности, работники региональных лесопожарных служб скорее включали в список болота, отнесенные к землям лесного фонда, даже если в этом регионе были более крупные и горимые торфяники на других категориях земли.

Список и описание наиболее пожароопасных болот Смоленской области по мнению регионального эксперта:

- 1) д. Свиты, Духовщинский район;
- 2) д. Романы, Велижский район (примыкание к неосушенному болоту);
- 3) д. Корсики (граница с Брянской областью), Ершицкий район;
- 4) ж/д станция Сошно, Духовщинский район;
- 5) д. Чистик, Руднянский район.

Показатели пожарной опасности по методу СТ+ отобранных экспертом торфяников приведены в таблице (жирным в таблице выделены совпадения с рейтингом наиболее пожароопасных болот по автоматически рассчитываемым показателям СТ+).

Проведенное сравнение выбора наиболее пожароопасных торфяников позволяет сделать вывод о том, что ранжирование осушенных болот по методу СТ+ (по максимальным значениям СТ в сочетании с другими автоматически определяемыми параметрами) может быть действенным инструментом поддержки принятия решений, помогающим экспертам более полно и комплексно подойти к отбору наиболее пожароопасных болот.

Важно понимать, что выбор торфяника для реализации проектов по снижению пожарной опасности не может определяться только автоматически вычисляемыми параметрами. В дальнейшем для отбора осушенных болот в целях реализации на них таких проектов также должны применяться дополнительные, в том числе социально-экономические критерии: плотность населения, наличие рядом крупных городов или критически важных объектов инфраструктуры, наличие на территории осушенного болота участков с радиационным загрязнением или неразорвавшимися боеприпасами, прогнозные уровни грунтовых вод, а также техническая и экономическая возможность реализации проектов.

Выводы

Предложенная методика оценки пожарной опасности осушенных торфяных болот на основе ретроспективного анализа данных спутникового мониторинга пожаров дает возможность выявления наиболее пожароопасных торфяников,

позволяет ранжировать осушенные болота по их пожарной опасности. Разработанный функционирующий веб-инструмент позволяет анализировать историю пожаров на большинстве осушенных торфяниках России за период с 2002 по настоящее время, а также оперативно обнаруживать термоточки в границах осушенных торфяных болот. Созданные методику и веб-инструмент можно использовать для поддержки управленческих решений при выборе наиболее пожароопасных болот при разработке проектов по снижению пожарной опасности и оценке результативности таких проектов. Веб-инструмент и базу данных осушенных торфяников и термоточек можно использовать для дальнейшего изучения закономерностей возникновения и развития пожаров на нарушенных болотах.

Список литературы

- [1] Куксин Г.В., Секерин И.М., Залесов С.В. Анализ оценки ущерба от торфяных пожаров в странах Дальнего зарубежья // Международный научно-исследовательский журнал, 2024. № 2. DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2024.140.43>
- [2] Залесов С.В., Секерин И.М., Кузнецов Л.Е., Куксин Г.В. Проблема лесных торфяных пожаров и пути ее решения // Лесные экосистемы бореальной зоны: биосферная роль, биоразнообразие, экологические риски. Красноярск: Изд-во ИЛСО РАН, 2024. С. 117–118.
- [3] Душа-Гудым С.И. Радиоактивные лесные пожары: особенности, профилактика, обнаружение и тушение // Предупреждение, ликвидация и последствия пожаров на радиоактивно загрязненных землях: сб. научных трудов. Вып. 54. Гомель: ИЛ НАН Беларуси, 2002. С. 91–100.
- [4] Белькова Т.А., Перминов В.А., Алексеев Н.А. Обзор эколого-экономических последствий торфяных пожаров // XXI век. Техносферная безопасность, 2016. № 3. С. 35–44.
- [5] Залесов С.В., Платонов Е.П., Платонов Е.Ю. Пожары и их последствия в Западной Сибири. Екатеринбург: Изд-во УГЛТУ, 2022. 191 с.
- [6] Сурина Е.А., Сеньков А.О., Горбунова С.В. Прогноз состояния лесов и система лесохозяйственных мероприятий по адаптации лесов к изменению климата // Интенсификация использования и воспроизводства лесов Сибири и Дальнего Востока. Хабаровск: Изд-во ДальНИИЛХ, 2021. С. 72–77.
- [7] Секерин И.М., Годовалов Г.А., Ерицов А.М., Залесов С.В. Специфика распространения и тушения торфяных пожаров в зимний период // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2022. Т. 26. № 5. С. 64–70. DOI: [10.18698/2542-1468-2022-5-64-70](https://doi.org/10.18698/2542-1468-2022-5-64-70)
- [8] Куксин Г.В., Секерин И.М., Залесов С.В. Особенности развития очагов торфяных пожаров в зимний период // Международный научно-исследовательский журнал, 2024. № 3. DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2024.141.43>
- [9] Куксин Г.В., Кузнецов Л.Е., Щеплягин П.В., Секерин И.М., Кректунов А.А. Причины возникновения

- многоочаговых торфяных пожаров // Эффективный ответ на современные вызовы с учетом взаимодействия человека и природы, человека и технологий: социально-экономические и экологические проблемы лесного комплекса: Материалы XV Междунар. науч.-техн. конф., Екатеринбург, 08 февраля 2024 г. Екатеринбург: Изд-во УГЛТУ, 2024. С. 148–151.
- [10] Секерин И.М., Кректунов А.А., Куксин Г.В., Кузнецов Л.Е., Щеплягин П.В. Проблемы торфяных пожаров и пути их решения // Эффективный ответ на современные вызовы с учетом взаимодействия человека и природы, человека и технологий: социально-экономические и экологические проблемы лесного комплекса: Материалы XV Междунар. науч.-техн. конф., Екатеринбург, 08 февраля 2024 г. Екатеринбург: Изд-во УГЛТУ, 2024. С. 255–257.
- [11] Приказ Рослесхоза от 05.07.2011 № 287 «Об утверждении классификации природной пожарной опасности лесов и классификации пожарной опасности в лесах в зависимости от условий погоды». URL: <https://docs.cntd.ru/document/902289183> (дата обращения 10.02.2025).
- [12] Секерин И.М., Годовалов Г.А., Залесов С.В., Ерицов А.М., Кректунов А.А. Уточненная классификация природной пожарной опасности лесов на примере лесного фонда Свердловской области // Природообустройство, 2023. № 3. С. 123–129. DOI: 10.26897/1997-6011-2023-3
- [13] Куксин Г.В., Секерин И.М., Залесов С.В. Обнаружение зимующих торфяных пожаров дистанционными методами // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2024. Т. 28. № 4. С. 53–65. DOI: 10.18698/2542-1468-2024-4-53-65
- [14] Секерин И.М., Ерицов А.М., Кректунов А.А., Залесов С.В. Опыт тушения торфяных пожаров на Среднем Урале // Международный научно-исследовательский журнал, 2022. № 5 (199). Ч. 2. С. 81–85. DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2022.119.5.014>
- [15] Секерин И.М., Ерицов А.М., Кректунов А.А., Залесов С.В. Эффективный способ тушения торфяных пожаров в зимний период // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии, 2023. Вып. 245. С. 23–35.
- [16] Секерин И.М., Залесов С.В., Ерицов А.М., Кректунов А.А. Опыт тушения торфяных пожаров подтоплением // Сибирский лесной журнал, 2023. № 6. С. 119–126. DOI: 10.15372/SJF.20230612
- [17] Minasny B., Berglund Ö., Connolly J., Hedley C.B. Digital mapping of peatlands — A critical review // Earth-Science Reviews, 2019, v. 196, p. 102870. DOI: 10.1016/j.earscirev.2019.05.014
- [18] Vompersky S.E., Sirin A.A., Sal'nikov A.A., Tsyganova O.P. Estimation of forest cover extent over peatlands and paludified shallow-peat lands in Russia // Contemporary Problems of Ecology, 2011, v. 4, pp. 734–741.
- [19] Сирин А.А., Маслов А.А., Валяева Н.А., Цыганова О.П., Глухова Т.В. Картографирование торфяников Московской области на основе данных дистанционного зондирования высокого разрешения // Современные проблемы экологии и охраны окружающей среды, 2014. № 7. С. 808–814. <https://doi.org/10.1134/S1995425514070117>
- [20] Сирин А.А. Многоспектральный спутниковый мониторинг изменения почвенно-растительного покрова и снижения пожарной опасности после масштабного повторного заболачивания торфяников после торфяных пожаров 2010 г. в Московской области (Россия) // Экологическая инженерия, 2020. Т. 158. С. 106044.
- [21] Napreenko M., Danchenkov A., Napreenko-Dorokhova T., Samerkhanova A. Vegetation mapping in drained peatlands for the carbon research objectives: a case study from Kaliningrad Region // Mires & Peat, 2023, no. 29(19), p. 25.
- [22] Sendžikaitė J., Truus L., Strazdina L., Jarašius L. First data on application of gest approach in the Baltic region: vegetation mapping of pilot peatlands // Conference: Vegetation of Mires. Current Research on classification, mapping, use and conservation, Гродно, 26–28 сентября 2018 г. Минск: Колорград, 2018. С. 115–119.
- [23] Minasny B., Adetsu D.V., Aitkenhead M.J., Artz R. Mapping and monitoring peatland conditions from global to field scale // Biogeochemistry, 2024, v. 167, no. 4, pp. 383–425.
- [24] Sallinen A., Tuominen S., Kumpula T., Tahvanainen T. Undrained peatland areas disturbed by surrounding drainage: a large scale GIS analysis in Finland with a special focus on aapa mires // Mires and Peat, 2019, v. 24, no. 38, pp. 1–22. DOI: 10.19189/MaP.2018.AJB.391
- [25] Macfarlane F., Robb C., Coull M., Mckeen M. A deep learning approach for high-resolution mapping of Scottish peatland degradation // European J. of Soil Science, 2024, v. 75, no. 4, p. e13538. DOI: 10.1111/ejss.13538
- [26] Carless D., Luscombe D., Gatis N., Anderson K. Mapping landscape-scale peatland degradation using airborne lidar and multispectral data // Landscape Ecology, 2019, v. 34, pp. 1329–1345.
- [27] Melton J.R., Chan E., Millard K., Fortier M. A map of global peatland extent created using machine learning (Peat-ML) // Geoscientific Model Development, 2022, v. 15, no. 12, pp. 4709–4738.
- [28] Центр профилактики ландшафтных пожаров. Пожарная опасность осушенных торфяных болот. URL: <https://peatfires.nextgis.com/resource/5/display?panel=none> (дата обращения 10.02.2025).
- [29] Cattau M.E., Harrison M., Shinyo I., Tungau S. Sources of anthropogenic fire ignitions on the peat-swamp landscape in Kalimantan, Indonesia // Global Environmental Change, 2016, v. 39, pp. 205–219.
- [30] Atwood E.C., Lohberger S., Lorenz E., Halle W. Detection and characterization of low temperature peat fires during the 2015 fire catastrophe in Indonesia using a new high-sensitivity fire monitoring satellite sensor (FireBird) // PloS one, 2016, v. 11, no. 8, p. e0159410. DOI: 10.1371/journal.pone.0159410
- [31] Pérez C.C., Olthoff A.E., Trejo H.H., Rullán C. Evaluating the best spectral indices for burned areas in the tropical Pantanos de Centla Biosphere Reserve, Southeastern Mexico // Remote Sensing Applications: Society and Environment, 2022, v. 25, p. 100664.
- [32] Barboza C.E., Cayo E.Y.T., de Almeida C.M., Lopez R.S. Monitoring wildfires in the northeastern peruvian amazon using landsat-8 and sentinel-2 imagery in the GEE platform // ISPRS International J. of Geo-Information, 2020, v. 9, no. 10, p. 564. DOI: 10.3390/ijgi9100564

- [33] Glushkov I., Zhuravleva I., McCarty J.L., Komarova A. Spring fires in Russia: results from participatory burned area mapping with Sentinel-2 imagery // *Environmental research letters*, 2021, v. 16, no. 12, p. 125005. DOI:10.1088/1748-9326/ac3287
- [34] Ландшафтные пожары Восточной Европы. URL: https://maps.earthtouches.me/maps/fires_ml/#11.65/57.2794/40.2978 (дата обращения 10.02.2025).
- [35] Kuklina V., Sizov O., Rasputina E., Bilichenko I. Fires on ice: emerging permafrost peatlands fire regimes in Russia's subarctic taiga // *Land*, 2022, v. 11, no. 3, p. 322. DOI: 10.3390/land11030322
- [36] Kumari B., Pandey A. C. MODIS based forest fire hotspot analysis and its relationship with climatic variables // *Spatial Information Research*, 2020, v. 28, no. 1, pp. 87–99.
- [37] Visner M., Shirowzhan S., Pettit C. Spatial analysis, interactive visualisation and gis-based dashboard for monitoring spatio-temporal changes of hotspots of bushfires over 100 years in New South Wales, Australia // *Buildings*, 2021, v. 11, no. 2, p. 37.
- [38] Karanja S.K. Density-based Cluster Analysis Of Fire Hot Spots In Kenya's Wildlife Protected Areas: Dis. University of Nairobi, 2016.
- [39] Boubekraoui H., Maouni Y., Abdelilah G., Draoui M. Wildfires risk assessment using hotspot analysis and results application to wildfires strategic response in the region of Tangier-Tetouan-Al Hoceima, Morocco // *Fire*, 2023, v. 6, no. 8, p. 314.

Сведения об авторах

Куксин Григорий Валерьевич — канд. с.-х. наук, эксперт АНО «Центр профилактики ландшафтных пожаров», gkuksin1980@gmail.com

Залесов Сергей Вениаминович — д-р с.-х. наук, проф., зав. кафедрой лесоводства, ФГБОУ ВО «Уральский государственный лесотехнический университет», zalesovsv@m.usfeu.ru

Крючковская Людмила Алексеевна — руководитель АНО «Центр профилактики ландшафтных пожаров», zalesovsv@m.usfeu.ru

Зенкевич Юлия Эдуардовна — специалист по геоинформационным системам АНО «Центр профилактики ландшафтных пожаров», zalesovsv@m.usfeu.ru

Поступила в редакцию 11.11.2025.

Одобрено после рецензирования 12.03.2026.

Принята к публикации 20.05.2026.

FIRE HAZARD ASSESSMENT IN DRAINED PEATLANDS USING RETROSPECTIVE ANALYSIS OF FIRES DATA FROM SATELLITE REMOTE SENSING

G.V. Kuksin¹, S.V. Zalesov^{2✉}, L.A. Kryuchkovskaya¹, Yu.E. Zenkevich¹

¹Wildfires Prevention Center, 26, bld. 4, apt. 127, Dubninskaya st., 127591, Moscow, Russia

²Ural State Forestry Engineering University (UGLU), 37, Sibirskiy trakt st., 620100, Yekaterinburg, Russia

Zalesovsv@m.usfeu.ru

The study is dedicated to methods for assessing the fire hazard of drained peatlands based on satellite monitoring data. A set of criteria is proposed to evaluate the fire hazard level in drained peatlands using retrospective satellite fire data. The sum of hotspots (SH) is identified as the main criterion. Additional criteria for ranking (sorting) drained peat bogs according to their fire hazard are proposed. A web tool and publicly available database have been developed for analyzing hotspots in the contours of most Russian drained bogs, dividing hotspots by year, season, and data from different satellites. For peat fire prevention projects planning and implementation it is recommended to select the most fire hazardous peatlands that cause great damage in case of peat fire based on the specified parameters in combination with other factors (population density, proximity to cities).

Keywords: peat fire, hotspots, MODIS, VIIRS, Sentinel-2 satellite images, peat bog fire hazard, hotspots sum

Suggested citation: Kuksin G.V., Zalesov S.V., Kryuchkovskaya L.A., Zenkevich Yu.E. *Otsenka pozharной опасности osushennykh bolot s pomoshch'yu retrospektivnogo analiza pozharov proshlykh let po dannym kosmicheskogo monitoringa* [Assessment of fire hazard of drained swamps using retrospective analysis of fires of past years based on space monitoring data]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2026, vol. 30, no. 4, pp. 5–19. DOI: 10.17816/2542-1468-2026-4-5-19

References

- [1] Kuksin G.V., Sekerin I.M., Zalesov S.V. *Analiz otsenki ushcherba ot torfyanykh pozharov v stranakh Dal'nego zarubezh'ya* [Analysis of damage assessment from peat fires in far abroad countries]. *Mezhdunarodnyy nauchno-issledovatel'skiy zhurnal* [International Research J.], 2024, no. 2. DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2024.140.43>
- [2] Zalesov S.V., Sekerin I.M., Kuznetsov L.Ye., Kuksin G.V. *Problema lesnykh torfyanykh pozharov i puti yeye resheniya* [The problem of forest peat fires and ways to solve it]. *Lesnyye ekosistemy boreal'noy zony: biosfernaya rol', bioraznoobraziye, ekologicheskiye riski* [Forest ecosystems of the boreal zone: biosphere role, biodiversity, environmental risks]. Krasnoyarsk: ILSO RAS, 2024, pp. 117–118.
- [3] Dusha-Gudym S.I. *Radioaktivnyye lesnyye pozhary: osobennosti, profilaktika, obnaruzheniye i tusheniye* [Radioactive Forest Fires: Features, Prevention, Detection, and Extinguishing]. *Preduprezhdeniye, likvidatsiya i posledstviya pozharov na radioaktivno zagryaznennykh zemlyakh: sb. nauchnykh trudov* [Prevention, Elimination, and Consequences of Fires on Radioactively Contaminated Lands: Collection of Scientific Papers]. Issue 54. Gomel: IL NAS of Belarus, 2002, pp. 91–100.
- [4] Bel'kova T.A., Perminov V.A., Alekseyev N.A. *Obzor ekologo-ekonomicheskikh posledstviy torfyanykh pozharov* [Review of the Ecological and Economic Consequences of Peat Fires]. *XXI vek. Tekhnosfernaya bezopasnost'* [XXI Century. Technosphere Safety], 2016, no. 3, pp. 35–44.
- [5] Zalesov S.V., Platonov Ye.P., Platonov Ye.YU. *Pozhary i ikh posledstviya v Zapadnoy Sibiri* [Fires and Their Consequences in Western Siberia]. Yekaterinburg: Publishing House of USFTU, 2022, 191 p.
- [6] Surina Ye.A., Sen'kov A.O., Gorbunova S.V. *Prognoz sostoyaniya lesov i sistema lesokhozyaystvennykh meropriyatiy po adaptatsii lesov k izmeneniyu klimata* [Forest condition forecast and the system of forestry measures for forest adaptation to climate change]. *Intensifikatsiya ispol'zovaniya i vosproizvodstva lesov Sibiri i Dal'nego Vostoka* [Intensification of forest use and reproduction in Siberia and the Far East]. Khabarovsk: Far Eastern Research Institute of Forestry, 2021, pp. 72–77.
- [7] Sekerin I.M., Godovalov G.A., Eritsov A.M., Zalesov S.V. *Spetsifika rasprostraneniya i tusheniya torfyanykh pozharov v zimniy period* [Specifics of peat fires spreading and extinguishing in winter]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2022, vol. 26, no. 5, pp. 64–70. DOI: 10.18698/2542-1468-2022-5-64-70
- [8] Kuksin G.V., Sekerin I.M., Zalesov S.V. *Osobennosti razvitiya ochagov torfyanykh pozharov v zimniy period* [Features of peat fire development in winter]. *Mezhdunarodnyy nauchno-issledovatel'skiy zhurnal* [International Research J.], 2024, no. 3. DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2024.141.43>
- [9] Kuksin G.V., Kuznetsov L.Ye., Shcheplyagin P.V., Sekerin I.M., Krektunov A.A. *Prichiny vozniknoveniya mnogoochagovykh torfyanykh pozharov* [Causes of Multi-focal Peat Fires]. *Effektivnyy otvet na sovremennyye vyzovy s uchetom vzaimodeystviya cheloveka i prirody, cheloveka i tekhnologii: sotsial'no-ekonomicheskiye i ekologicheskiye problemy lesnogo kompleksa: mater. XV Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii* [An Effective Response to Modern Challenges Taking into Account the Interaction between Man and Nature, Man and Technology: Socio-Economic and Environmental Problems of the Forest Complex: Proc. of the XV International Scientific and Technical Conference], Yekaterinburg, February 08, 2024. Yekaterinburg: USLTU, 2024, pp. 148–151.

- [10] Sekerin I.M., Krektunov A.A., Kuksin G.V., Kuznetsov L.Ye., Shcheplyagin P.V. *Problemy torfyanykh pozharov i puti ikh resheniya* [Problems of Peat Fires and Ways to Solve Them]. Effektivnyy otvet na sovremennyye vyzovy s uchetom vzaimodeystviya cheloveka i prirody, cheloveka i tekhnologii: sotsial'no-ekonomicheskkiye i ekologicheskkiye problemy lesnogo kompleksa: mater. XV Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii [An Effective Response to Modern Challenges Taking into Account the Interaction between Man and Nature, Man and Technology: Socio-Economic and Environmental Problems of the Forest Complex: Proc. of the XV International Scientific and Technical Conference], Yekaterinburg, February 08, 2024. Yekaterinburg: USLTU, 2024, pp. 255–257.
- [11] *Prikaz Rosleskhoza ot 05.07.2011 № 287 «Ob utverzhdenii klassifikatsii prirodnoy pozharnoy opasnosti lesov i klassifikatsii pozharnoy opasnosti v lesakh v zavisimosti ot usloviy pogody»* [Order of the Federal Forestry Agency of July 5, 2011, no. 287, «On Approval of the Classification of Natural Forest Fire Hazard and the Classification of Forest Fire Hazard Depending on Weather Conditions». Available at: <https://docs.cntd.ru/document/902289183> (accessed 10.02.2025).
- [12] Sekerin I.M., Godovalov G.A., Zalesov S.V., Yeritsov A.M., Krektunov A.A. *Utochnennaya klassifikatsiya prirodnoy pozharnoy opasnosti lesov na primere lesnogo fonda Sverdlovskoy oblasti* [Refined Classification of Natural Forest Fire Hazard Using the Example of the Forest Fund of the Sverdlovsk Region]. Prirodoobustroystvo [Nature Management], 2023, no. 3, pp. 123–129. DOI: 10.26897/1997-6011-2023-3
- [13] Kuksin G.V., Sekerin I.M., Zalesov S.V. *Obnaruzhenie zimuyushchikh torfyanykh pozharov distantsionnymi metodami* [Detection of wintering peat-bog fires by remote methods]. Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin, 2024, vol. 28, no. 4, pp. 53–65. DOI: 10.18698/2542-1468-2024-4-53-65
- [14] Sekerin I.M., Yeritsov A.M., Krektunov A.A., Zalesov S.V. *Opyt tusheniya torfyanykh pozharov na Srednem Urale* [Experience of extinguishing peat fires in the Middle Urals]. Mezhdunarodnyy nauchno-issledovatel'skiy zhurnal [International Research J.], 2022, no. 5 (199), part 2, pp. 81–85. DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2022.119.5.014>
- [15] Sekerin I.M., Yeritsov A.M., Krektunov A.A., Zalesov S.V. *Effektivnyy sposob tusheniya torfyanykh pozharov v zimniy period* [An effective method for extinguishing peat fires in winter]. Izvestiya Sankt-Peterburgskoy lesotekhnicheskoy akademii [Bulletin of the St. Petersburg Forest Engineering Academy], 2023, iss. 245, pp. 23–35.
- [16] Sekerin I.M., Zalesov S.V., Yeritsov A.M., Krektunov A.A. *Opyt tusheniya torfyanykh pozharov podtopleniyem* [Experience of extinguishing peat fires by flooding]. Sibirskiy lesnoy zhurnal [Siberian Forest J.], 2023, no. 6, pp. 119–126. DOI: 10.15372/SJF.20230612
- [17] Minasy B., Berglund Ö., Connolly J., Hedley C.B. Digital mapping of peatlands — A critical review. Earth-Science Reviews, 2019, v. 196, p. 102870. DOI:10.1016/j.earscirev.2019.05.014
- [18] Vompersky S.E., Sirin A.A., Sal'nikov A.A., Tsyganova O.P. Estimation of forest cover extent over peatlands and paludified shallow-peat lands in Russia. Contemporary Problems of Ecology, 2011, v. 4, pp. 734–741.
- [19] Sirin A.A., Maslov A.A., Valyayeva N.A., Tsyganova O.P., Glukhova T.V. *Kartografirovaniye torfyanikov Moskovskoy oblasti na osnove dannykh distantsionnogo zondirovaniya vysokogo razresheniya* [Mapping peatlands of the Moscow region based on high-resolution remote sensing data]. Sovremennyye problemy ekologii i okhrany okruzhayushchey sredy [Modern problems of ecology and environmental protection], 2014, no. 7, pp. 808–814. <https://doi.org/10.1134/S1995425514070117>
- [20] Sirin A.A. *Mnogospektral'nyy sputnikovyy monitoring izmeneniya pochvenno-rastitel'nogo pokrova i snizheniya pozharnoy opasnosti posle masshtabnogo povtornogo zabolachivaniya torfyanikov posle torfyanykh pozharov 2010 g. v Moskovskoy oblasti (Rossiya)* [Multispectral satellite monitoring of changes in soil and vegetation cover and fire hazard reduction after large-scale peatland rewetting following the 2010 peat fires in the Moscow region (Russia)]. Ekologicheskaya inzheneriya [Ecological Engineering], 2020, v. 158, p. 106044.
- [21] Napreenko M., Danchenkov A., Napreenko-Dorokhova T., Samerkhanova A. Vegetation mapping in drained peatlands for the carbon research objectives: a case study from Kaliningrad Region. Mires & Peat, 2023, no. 29(19), p. 25.
- [22] Sendzikaitė J., Truus L., Strazdina L., Jarašius L. First data on application of gest approach in the Baltic region: vegetation mapping of pilot peatlands. Conference: Vegetation of Mires. Current Research on classification, mapping, use and conservation, Grodno, September 26–28, 2018. Minsk: Kolorgrad, 2018, pp. 115–119.
- [23] Minasy B., Adetsu D.V., Aitkenhead M.J., Artz R. Mapping and monitoring peatland conditions from global to field scale. Biogeochemistry, 2024, v. 167, no. 4, pp. 383–425.
- [24] Sallinen A., Tuominen S., Kumpula T., Tahvanainen T. Undrained peatland areas disturbed by surrounding drainage: a large scale GIS analysis in Finland with a special focus on aapa mires. Mires and Peat, 2019, v. 24, no. 38, pp. 1–22. DOI: 10.19189/MaP.2018.AJB.391
- [25] Macfarlane F., Robb C., Coull M., Mckeen M. A deep learning approach for high-resolution mapping of Scottish peatland degradation. European J. of Soil Science, 2024, v. 75, no. 4, p. e13538. DOI:10.1111/ejss.13538
- [26] Carless D., Luscombe D., Gatis N., Anderson K. Mapping landscape-scale peatland degradation using airborne lidar and multispectral data. Landscape Ecology, 2019, v. 34, pp. 1329–1345.
- [27] Melton J.R., Chan E., Millard K., Fortier M. A map of global peatland extent created using machine learning (Peat-ML). Geoscientific Model Development, 2022, v. 15, no. 12, pp. 4709–4738.
- [28] *Tsentr profilaktiki landshaftnykh pozharov. Pozharnaya opasnost' osushennykh torfyanykh bolot* [Wildfires Prevention Center. Fire hazard of drained peatlands]. Available at: <https://peatfires.nextgis.com/resource/5/display?panel=none> (accessed 10.02.2025).
- [29] Cattau M.E., Harrison M., Shinyo I., Tungau S. Sources of anthropogenic fire ignitions on the peat-swamp landscape in Kalimantan, Indonesia. Global Environmental Change, 2016, v. 39, pp. 205–219.
- [30] Atwood E.C., Lohberger S., Lorenz E., Halle W. Detection and characterization of low temperature peat fires during the 2015 fire catastrophe in Indonesia using a new high-sensitivity fire monitoring satellite sensor (FireBird). PloS one, 2016, v. 11, no. 8, p. e0159410. DOI:10.1371/journal.pone.0159410

- [31] Pérez C.C., Olthoff A.E., Trejo H.H., Rullán C. Evaluating the best spectral indices for burned areas in the tropical Pantanos de Centla Biosphere Reserve, Southeastern Mexico. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 2022, v. 25, p. 100664.
- [32] Barboza C.E., Cayo E.Y.T., de Almeida C.M., Lopez R.S. Monitoring wildfires in the northeastern peruvian amazon using landsat-8 and sentinel-2 imagery in the GEE platform. *ISPRS International J. of Geo-Information*, 2020, v. 9, no. 10, p. 564. DOI: 10.3390/ijgi9100564
- [33] Glushkov I., Zhuravleva I., McCarty J.L., Komarova A. Spring fires in Russia: results from participatory burned area mapping with Sentinel-2 imagery. *Environmental research letters*, 2021, v. 16, no. 12, p. 125005. DOI:10.1088/1748-9326/ac3287
- [34] *Landshaftnye pozhary Vostochnoj Evropy* [Landscape fires in Eastern Europe]. Available at: https://maps.earthtouches.me/maps/fires_ml/#11.65/57.2794/40.2978 (accessed 10.02.2025).
- [35] Kuklina V., Sizov O., Rasputina E., Bilichenko I. Fires on ice: emerging permafrost peatlands fire regimes in Russia's subarctic taiga. *Land*, 2022, v. 11, no. 3, p. 322. DOI: 10.3390/land11030322
- [36] Kumari B., Pandey A. C. MODIS based forest fire hotspot analysis and its relationship with climatic variables. *Spatial Information Research*, 2020, v. 28, no. 1, pp. 87–99.
- [37] Visner M., Shirowzhan S., Pettit C. Spatial analysis, interactive visualisation and gis-based dashboard for monitoring spatio-temporal changes of hotspots of bushfires over 100 years in New South Wales, Australia. *Buildings*, 2021, v. 11, no. 2, p. 37.
- [38] Karanja S.K. Density-based Cluster Analysis Of Fire Hot Spots In Kenya's Wildlife Protected Areas: Dis. University of Nairobi, 2016.
- [39] Boubekraoui H., Maouni Y., Abdelilah G., Draoui M. Wildfires risk assessment using hotspot analysis and results application to wildfires strategic response in the region of Tangier-Tetouan-Al Hoceima, Morocco. *Fire*, 2023, v. 6, no. 8, p. 314.

Authors' information

Kuksin Grigoriy Valer'yevich — Cand. Sci. (Agriculture), expert of NGO «Wildfire Prevention Center», gkuksin1980@gmail.com

Zalesov Sergey Veniaminovich — Dr. Sci. (Agriculture), Professor, Head of the Department of Forestry, Ural State Forestry University, zalesovsv@m.usfeu.ru

Kryuchkovskaya Lyudmila Alekseyevna — Head of NGO «Wildfire Prevention Center», zalesovsv@m.usfeu.ru

Zenkevich Yuliya Eduardovna — GIS-specialist at NGO «Wildfire Prevention Center», zalesovsv@m.usfeu.ru

Received 11.11.2025.

Approved after review 12.03.2026.

Accepted for publication 20.05.2026.

Вклад авторов: все авторы в равной доле участвовали в написании статьи

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

Authors' Contribution: All authors contributed equally to the writing of the article

The authors declare that there is no conflict of interest