
ПРИРОДНЫЕ И ТЕХНОПРИРОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ

УДК 911.2

ГЕОБОТАНИЧЕСКАЯ ИНДИКАЦИЯ СОСТОЯНИЯ НАРУШЕННЫХ ТОРФЯНИКОВ ДЛЯ ОЦЕНКИ ПОЖАРООПАСНОСТИ

© 2024 г. Т. В. Орлов^{1,*}, М. В. Архипова¹, В. В. Бондарь¹, Р. О. Разумовский¹,
В. А. Смагин², К. Л. Шахматов³

¹Институт геоэкологии им. Е.М. Сергеева РАН,
Уланский пер., 13, стр. 2, Москва, 101000 Россия

²Ботанический институт им. В.Л. Комарова РАН,
ул. Профессора Попова, 2, Санкт-Петербург, 197376 Россия

³Тверской Государственный технический университет,
ул. Желябова, 33, Тверь, 170100 Россия

*E-mail: tim.orlov@gmail.com

Поступила в редакцию 01.04.2024 г.

После доработки 19.04.2024 г.

Принята к публикации 03.06.2024 г.

Проблема пожароопасности заброшенных торфяников в настоящее время является особенно актуальной, так как негативные последствия торфяных пожаров приводят к ухудшению здоровья населения и влияют на общество. Однако взаимосвязям растительных сообществ с частотой пожаров уделяется недостаточно внимания. Исследование посвящено оценке состояния нарушенных торфяников с помощью геоботанической индикации торфяных грунтов на примере торфяников в Ленинградской и Псковской областях. Выбрано 3 ключевых объекта — заброшенные, разрабатываемые в середине XX в. торфяные месторождения. В основе методики оценки пожароопасности торфяников лежат комплексный подход, включающий в себя создание крупномасштабных карт растительности с помощью серии спутниковых снимков и полевых геоботанических описаний, и анализ пожаров на объектах за период с 2000 по 2023 г. с помощью спутниковых снимков и данных по термоточкам. В результате исследования получены карты частоты и длительности пожаров и карты групп ассоциаций растительности на каждый участок. Анализ взаимосвязи растительных сообществ с частотой пожаров показал, что видовой состав сообществ относительно хорошо коррелирует со временем, прошедшим с даты последнего пожара, и в меньшей степени — с длительностью пожаров. Связь между частотой пожаров и состоянием растительного покрова достаточно сильная, поэтому тип растительного покрова можно использовать как индикатор частоты пожаров на торфянике. На территориях с торфяными пустошами с редким березовым древостоем пожар происходит не менее одного раза в 5 лет. На территориях, занятых сфагновыми и тростниковыми сообществами на обводненной поверхности торфа, пожар происходит не чаще, чем один раз в 20 лет. Полученные результаты могут применены для экспресс оценки состояния нарушенных торфяников и прогноза их пожароопасности.

Ключевые слова: пожароопасность, торфяники, геоботаническая индикация, Северо-Западный федеральный округ

DOI: 10.31857/S0869780924030042 EDN: SPRJYW

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время осушенные, а также выработанные торфяники занимают большие площади в различных субъектах Российской Федерации [15]. В большинстве своем они заброшены, и работа мелиоративных систем не контролируется. Это приводит к тому, что торфяные грунты в их пределах находятся в осушенном состоянии и могут легко воспламениться.

Подобные объекты, с одной стороны, относительно труднодоступны, так как включают в себя

большое количество каналов, с другой стороны, находятся в непосредственной близости от населенных пунктов. Большинство из таких торфяных месторождений разрабатывались в целях добычи топлива для местных электростанций [15]. Поэтому возгорания на торфяниках зачастую напрямую влияют на жизнедеятельность человека.

Проблема пожароопасности торфяных болот является общемировой, так, например, на основе спутниковых снимков разрабатывался индекс пожароопасности торфяных лесов на территории

Малайзии [24]. В исследовании мощных пожаров Индонезии и острова Калимантан [23, 25] с помощью данных FIRMS анализировались площади выгоревших территорий, причины и частота возгораний, также разрабатывались алгоритмы для картирования лесных пожаров на юге Индии [27]. Huang и Rein [29] в своих исследованиях разработали модель, показывающую роль влажности торфа в возгораниях. Исследовались торфяники западного региона Канады [26, 28], где изучалась динамика площадей сгоревших территорий.

Проблемой пожароопасности заброшенных торфяных месторождений и их мелиорации в России занимались многие исследователи [3, 9, 10]. Множество работ посвящено картографированию торфяных болот в различных регионах Российской Федерации. М.А. Медведева с соавторами [11] оценивали состояние растительности торфяников по данным космической съемки. Они использовали 6 основных классов растительного покрова, которые выделялись с помощью космической съемки: открытый торф (участки открытого торфа с разреженным растительным покровом; кипрейные, вейниковые и березово-вейниковые сообщества; сообщества с преобладанием сосны различной степени угнетенности; сообщества с преобладанием ивы и березы; гидрофильные сообщества с рогозом и камышом на обводненных участках; водоемы. Выполнено картографирование торфяных болот на примере Рязанской области [7]. А.В. Сонюшкин, А.В. Шумилин [20] проводили мониторинг возгораний на территории России с помощью спутниковой съемки.

А.Н. Субботин [21], а вслед за ним А.М. Гришин [4] разработали и использовали упрощенную математическую модель торфяных пожаров, с помощью которой была решена задача о стационарном распространении фронта торфяного пожара. Было установлено, что структура фронта торфяного пожара в качественном отношении совпадает со структурой фронта лесного пожара, и горение носит диффузионный характер, т.е. лимитируется притоком окислителя.

А.И. Фильков [22] отмечает, что повышенная пожарная опасность торфа обусловлена его пористой структурой, малой плотностью и наличием в составе до 40% кислорода, и обращает внимание на важную роль растительных сообществ, как индикаторов типов торфяных пожаров. Существенным фактором является то, что процесс развития пожаров зависит от влажности верхнего слоя торфяной залежи. Большая влажность торфяного пласта не позволяет огню проникать в глубину залежи. Поэтому пожары на торфяниках, как правило, распространяются по поверхности массива. Поэтому необходима оценка факторов пожароопасности при торфодобыче, к числу основных из которых относятся горимость абсолютно сухого вещества торфа, метеорологические факторы, первоначальная влажность верхнего слоя

торфяной залежи, такие метеорологические факторы, например, скорость ветра, и др. Н.П. Ахметьева с соавторами отмечает [1], что физико-химические свойства торфа в природной обстановке свидетельствуют о том, что торф имеет склонность к возгоранию лишь при возникновении аномальных погодных и техногенных условий. Основная причина возникновения пожаров — хозяйственная деятельность человека (осушение торфа, создание высоких безнадзорных буртов торфа, разведение костров, пал травы, применение на торфяниках неисправной техники).

Н.П. Ахметьева с соавторами [2] детально проанализировала состав и скорость появления отдельных видов растений на месте гарей для двух ключевых участков.

В.В. Панов с соавторами [16, 18] выделил несколько основных типов пространственного распространения гарей и отметил, что различные виды гарей на торфяниках зарастают по-разному. Так на “моховой” гари, для которой характерно выгорание сухих центральных частей моховых сплавин, моховой покров восстанавливается уже при следующей вегетации. На “поверхностной” гари (выгорание ровного слоя торфа глубиной до 2 м) характерны медленное зарастание рудеральными видами и колонизация березой. Подобный характер зарастания свойственен также для “холмисто-ямной” и “грядовой” гарей. Для “ямо-западинной” гари характерно медленное зарастание луговыми лесными видами. В [17] были определены основные факторы пожароопасности выработанных торфяников, основные из них: наличие остаточного слоя торфа, наличие окраек с лесом высокого бонитета, способ добычи, складирование остатков торфяного сырья, населенные пункты на торфяниках, наличие дорог внутри торфяника, и разработан классификатор, на основе которого с помощью бальной оценки разработаны классы от I до V техногенной пожарной опасности торфяных участков.

В.В. Панов [14, 15] разработал концептуальные схемы восстановления торфяников в естественных условиях и в условиях вторичного обводнения. Начиная с XXI в. широко изучаются и разрабатываются методы предотвращения и сокращения торфяных пожаров на осушенных болотах [12]. Активно применяются методы вторичного обводнения заброшенных торфяников с целью восстановления естественного состояния растительности на болотах, снижения частоты торфяных пожаров и сокращения эмиссии парниковых газов [13].

Несмотря на обширные исследования в этой области, взаимосвязям растительных сообществ с частотой пожаров уделяется недостаточно внимания. Оценка пожароопасности торфяников особенно актуальна, когда нарушенные торфяники располагаются в непосредственной близости от населенных пунктов, которые страдают от пожаров и задымления торфяными возгораниями,

особенно для некоторых областей Северо-Западного федерального округа.

Целью работы являлась оценка состояния нарушенных торфяников с помощью геоботанической индикации для оценки их пожароопасности на примере торфяников в Ленинградской и Псковской областях.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В качестве ключевых участков исследования были выбраны торфяники: Гладкий Мох и Малодубровское в Ленинградской обл. и Заячий Отрог в Псковской обл. (рис. 1). Они представляют собой торфяные месторождения, добыча торфа на которых, преимущественно фрезерным способом, активно велась в советское время и была остановлена в период с 1990 по 2005 г. Участки расположены в южной подзоне тайги с развитием подзолистых, дерново-подзолистых и болотных почв.

Методика оценки пожароопасности нарушенных торфяников включала в себя несколько этапов: составление карт растительности, анализ частоты и длительности пожаров на участках и анализ взаимосвязи растительности с характеристиками (площадью, частотой, длительностью) пожаров.

Составление карт растительности базируется на использовании различных дистанционных съемок с опорой на полевые наблюдения и измерения. Первый этап включает построение предварительных карт растительности на основе разносезонной космической съемки, второй этап — построение детальных карт растительного покрова на основе совместного использования космической и аэрофотосъемки.

В основе обоих этапов лежат следующие универсальные подходы:

- использование методов машинного обучения, таких как Random Forest при полуавтоматизированной классификации изображений;
- использование полевых описаний.

Авторским коллективом разработаны методика детального индикационного картографирования торфяников с помощью космической съемки с опорой на съемку с БПЛА и эталонные описания для оценки пожароопасности. Методика состоит из нескольких этапов:

- подбор снимков;
- картографирование состояния групп ассоциаций растительности по экологическим свойствам природных комплексов;

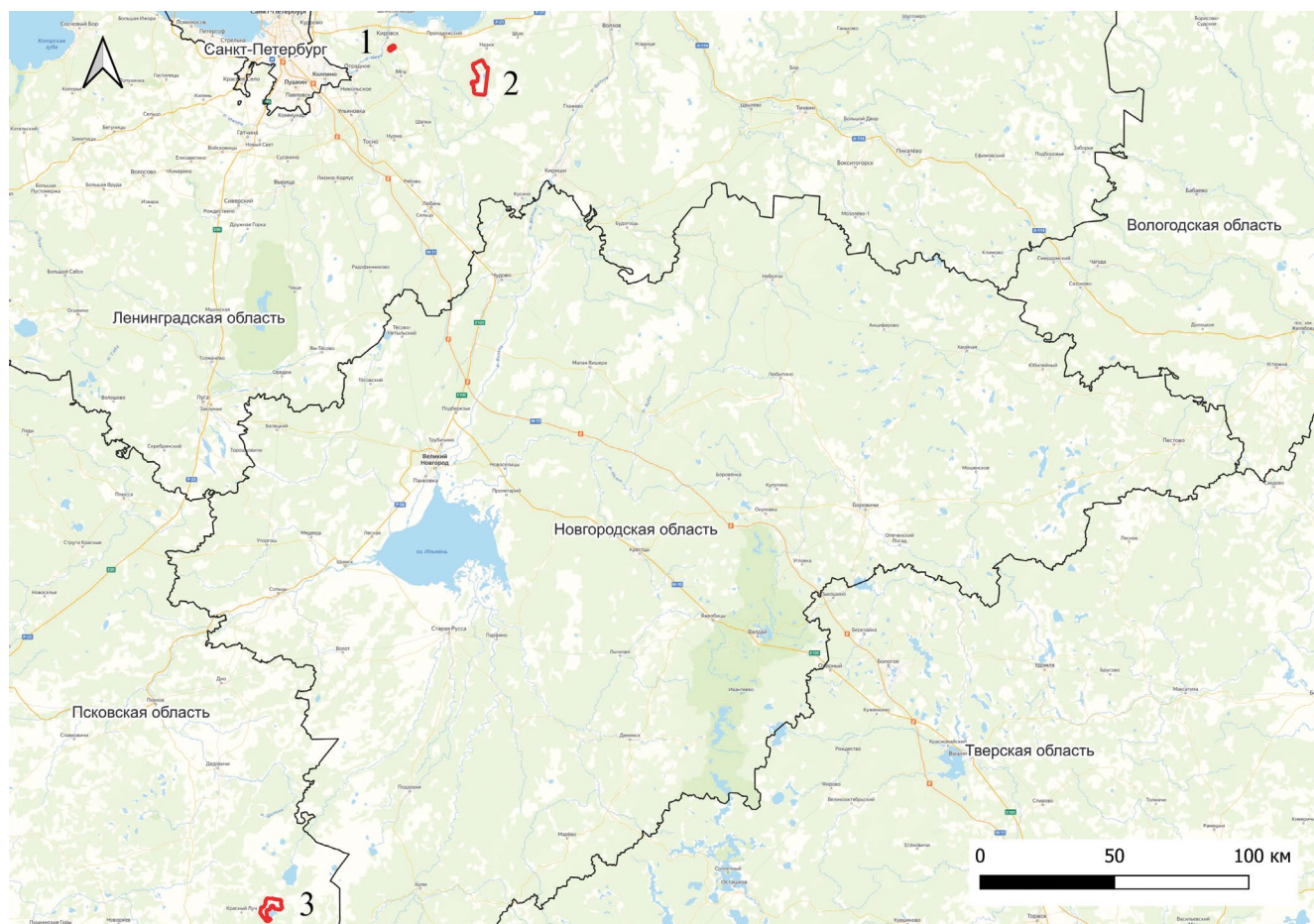


Рис. 1. Расположение эталонных участков: 1 — Малодубровское, 2 — Гладкий Мох, 3 — Заячий Отрог.

- картографирование участков, пройденных огнем в разное время;
- описание растительности;
- разработка классификационных единиц для картографирования.

В работе использованы следующие материалы космической съемки:

- для анализа пожаров – серия космических снимков среднего разрешения на период с 1984 по 2023 г. При дешифрировании процессов возгораний использовались снимки Landsat 4–5 MT (1985–1998) с разрешением 30 м/пикс; Landsat 7 (1999–2012) с разрешением 15 м/пикс; Landsat 8 (2013–2015) с разрешением 15 м/пикс и Sentinel-2 (2016–2023) с разрешением 10 м/пикс;
- для картографирования состояния растительного покрова – разносезонные снимки Sentinel-2 (2023) с разрешением 10 м/пикс; снимки сверхвысокого разрешения с разрешением 0.5 м/пикс; ортофотопланы, полученные на основе съемки БПЛА с разрешением 0.1 м/пикс.

На рис. 2 приводится принципиальная схема методики, разработанной авторами.

С помощью анализа данных NASA FIRMS, которые фиксируют даты возникновения пожаров, можно выявить все возгорания за выбранный период времени на исследуемых торфяниках. Каждый очаг пожара дешифрируется по оптическому снимку на тот момент, когда он перестает увеличиваться. Продолжительность каждого пожара определяется разницей дат “термоточек”, его

фиксирующих, или по разнице дат ближайших оптических снимков (до и после пожара) (рис. 3).

Описания растительности проводились по стандартной методике на площадках 10×10 м на открытых участках и на площадках 20×20 м на лесных участках. Всего было сделано 69 геоботанических описаний. Для оценки связи обилия видов с частотой, длительностью и временем, прошедшем после последнего пожара, использовался коэффициент корреляции Пирсона. На каждом участке проводились замеры мощности торфяной залежи, отбирались пробы торфа на анализ основных свойств и состава торфяного грунта.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Анализ частоты пожаров. Ключевые торфяники за весь период наблюдений подвергались возгораниям с различной частотой и длительностью. Наибольшее количество пожаров отмечено на торфянике Заячий Отрог (19) и Малодубровское (12), в меньшей степени на торфянике Гладкий Мох (10). Краткая характеристика пожарной активности на участках показана в табл. 1.

Анализ торфа и растительности. На торфянике Малодубровское мощность торфяной залежи варьируется от 0.5 до 1.7 м, на наиболее часто горящих участках преимущественно верховой тип торфа с относительной влажностью от 86.3 до 87.7%. Степень разложения торфа составляет 30–50%. На торфянике Гладкий Мох мощность торфа составляет от 0.2 до 2.5 м, на наиболее часто горящих участках распространен верховой

Таблица 1. Пожарная активность на участках

Торфяник	Количество пожаров за 38 лет	Описание возгораний
Малодубровское	12	В основном после окончания торфоразработок (1990 г.). Наиболее продолжительный пожар наблюдался в июле 1999 г., до 20 дней, охватил 44% участка. Сильные пожары отмечались в августе 1996 г., в сентябре 2006 г. и в мае 1990 г. Наиболее частые пожары до 7 лет, наблюдаются в самой центральной части заброшенного торфяника. Единичные случаи возгораний наблюдаются на периферии участка
Гладкий Мох	10	В основном в южной и центральной части, где преобладают слаболесенные участки открытого торфа. Наиболее мощный пожар произошел в августе 2002 г., охватил несколько участков и длился больше месяца (21% всей площади). Также длительный пожар с середины июня до конца октября наблюдался в 2023 г. Максимальная длительность пожаров составила 82 дня, преимущественно также в западной и юго-западной части торфяника. Средняя продолжительность – около 15 дней
Заячий Отрог	19	Наиболее продолжительный пожар (около 2-х месяцев) наблюдался на всем восточном секторе (27%). Наиболее частые пожары, но менее обширные, фиксируются именно в западной части. Здесь максимальная частота составляет 5 лет, в основном это более открытые и более дренированные северные территории

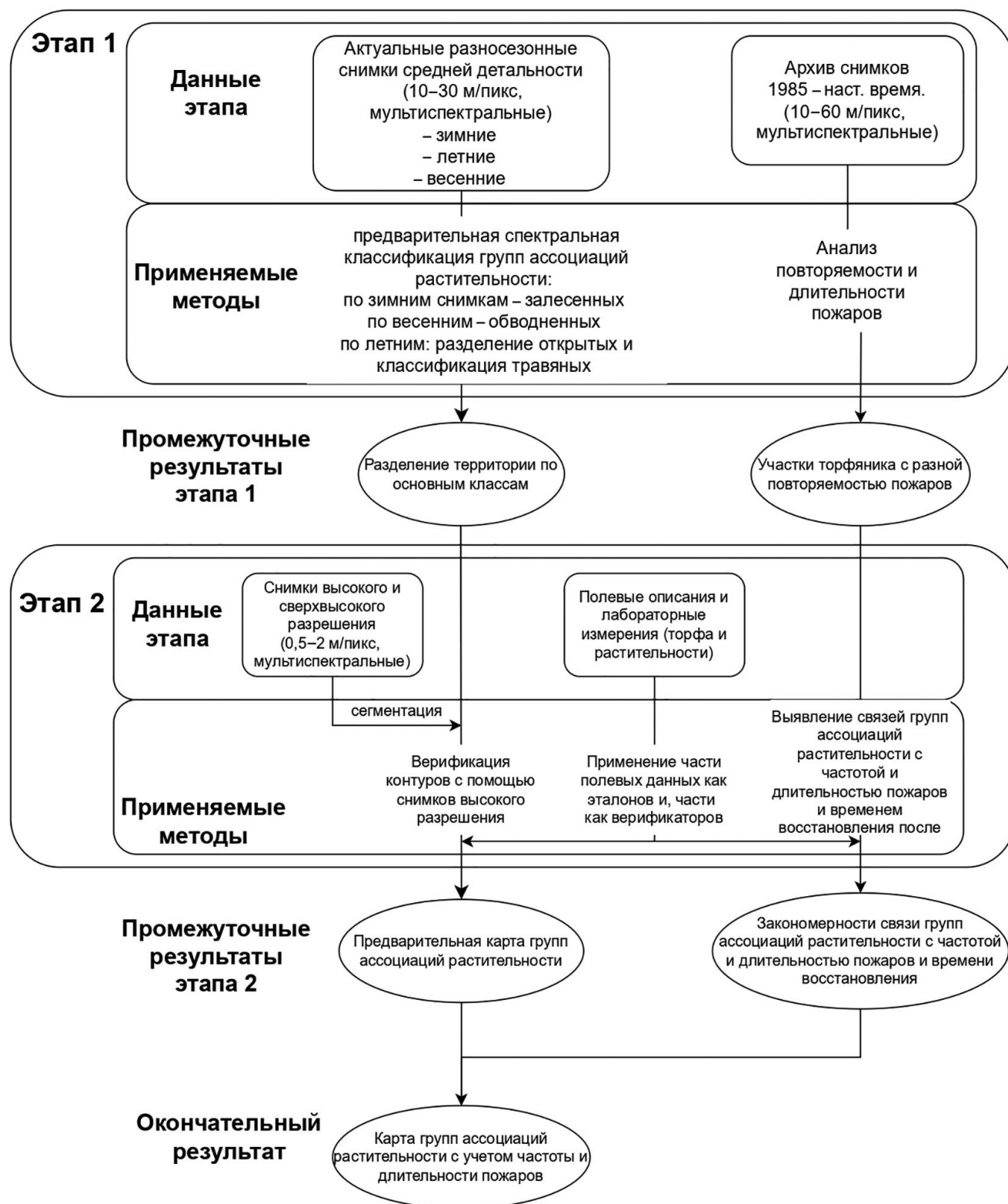


Рис. 2. Принципиальная схема методики детального индикационного картографирования торфяников.

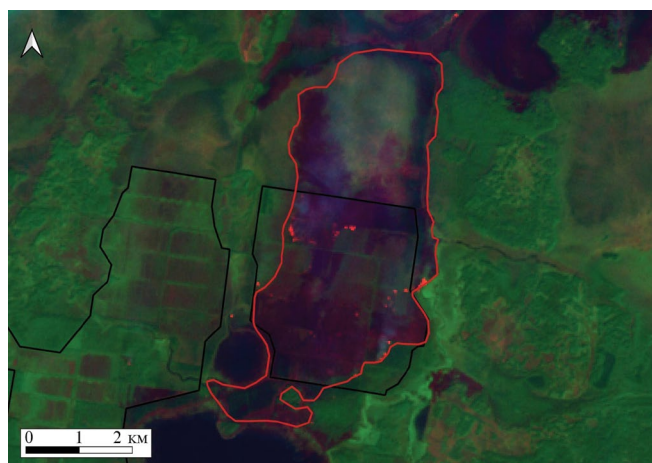


Рис. 3. Распространение пожара на торфянике Заячий Отрог, 30 августа 2002 г.

тип торфа с относительной влажностью от 85.5 до 90.0%. Степень разложения торфа составляет 50–70%. На торфянике Заячий Отрог мощность торфа от 0.8 до 2.5 м, тип торфяной залежи смешанный низинно-верховой.

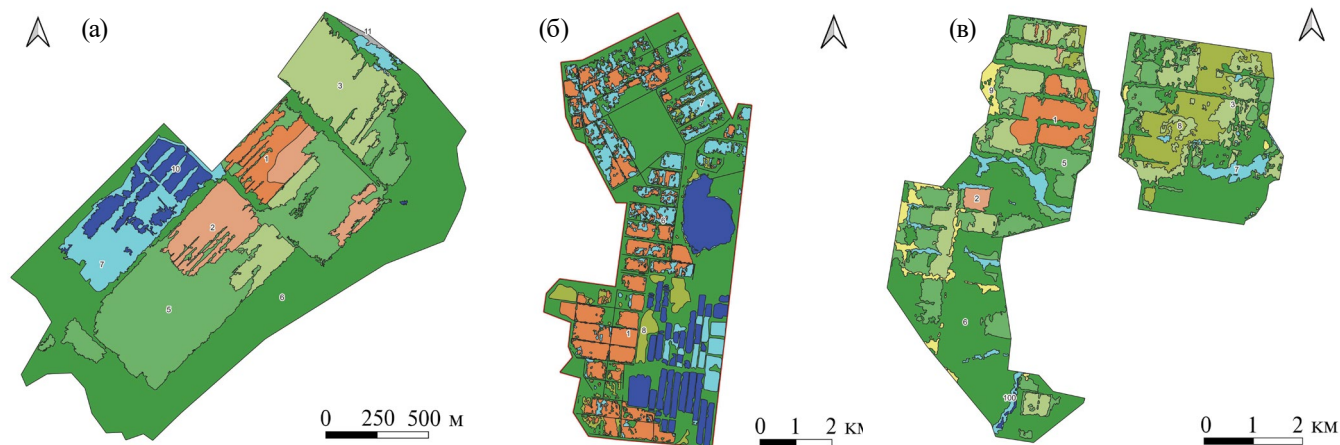
На экспертной основе были выделены следующие группы ассоциаций растительности:

- 1 – участки открытого торфа с отдельными кочками пушицы влагалищной (*Eriophorum vaginatum*), пятнами политрихума (*Politrichum strictum*);
- 2 – пушицево-политриховые сообщества;

- 3 – кустарничково (*Calluna vulgaris*)-политриховые сообщества с пушицей влагалищной;
- 4 – осоково (*Carex spp*)/тростниково (*Phragmites australis*)-политриховые сообщества;
- 5 – березовые (*Betula pubescens*), сосновые (*Pinus sylvestris*) пушицево-политриховые сообщества с кустарничками (преимущественно вереском);
- 6 – леса березовые, леса сосновые, леса березово-сосновые злаковые или зеленомошные;
- 7 – тростниковые, осоковые, очеретниковые (*Rhynchospora alba*), ивовые (*Salix spp.*) сообщества часто обоводненные;
- 8 – березовые/сосновые кустарничковые (*Ledum palustre*, *Vaccinium uliginosum*) сфагновые сообщества, частью с ковром из сфагновых мхов;
- 9 – разнотравно-злаковые сообщества (луга).

Данные группы связаны как со свойствами пожарной опасности территории, так и с возможностью картографирования по дистанционным данным. Данные дистанционного зондирования позволяют выявить лишь основные доминанты растительных сообществ. Для осушенных торфяников в большинстве случаев этого достаточно.

В результате получены карты групп ассоциаций растительности на каждый участок (рис. 4), на которых основной картографируемой единицей являются растительные сообщества ранга группа ассоциаций. Всего было выделено 9 групп ассоциаций (табл. 2). Осоково/тростниково-политриховая



Природно-территориальные комплексы:

- Участки открытого торфа с отдельными кочками пушицы влагалищной, пятнами политрихума (1)
- Пушицево-политриховые участки (2)
- Кустарничково-политриховые участки с пушицей влагалищной (3)
- Березово/сосново-пушицево-политриховые участки с кустарничками (преимущественно вереском) (5)
- Лесные сообщества с преобладанием березы и/или сосны злаковые или зеленомошные (6)
- Тростниковые, осоковые, очеретниковые участки, часто обоводненные (7)
- Березовые/сосновые кустарничковые сфагновые участки или со значительным участием сфагнума (8)
- Луговые сообщества (9)
- Вода (10)

Рис. 4. Карты групп ассоциаций растительности участков: а – Малодубровское, б – Гладкий Мох, в – Заячий Отрог.

Таблица 2. Площади групп ассоциаций растительности

Группа	Название	Площадь, га	% от общей площади	Средняя частота пожаров
Малодубровское				
1	Участки открытого торфа с отдельными кочками пушицы влагалищной и пятнами политрихума	7.03	3.08	0.1
2	Пушицево-политриховые участки	16.19	7.09	0.13
3	Кустарничково-политриховые участки с пушицей влагалищной	25.93	11.36	0.08
5	Березово/сосново-пушицево-политриховые участки с кустарничками (преимущественно вереском)	58.03	25.42	0.11
6	Лесные сообщества с преобладанием березы и/или сосны злаковые или зеленомошные	94.00	41.18	0.001
7	Тростниковые, осоковые, очеретниковые участки, часто обводненные	17.37	7.61	0.05
Общая площадь			228.271	
Гладкий Мох				
1	Участки открытого торфа с отдельными кочками пушицы влагалищной и пятнами политрихума	784.63	17.44	0.1
6	Лесные сообщества с преобладанием березы и/или сосны злаковые или зеленомошные	2109.42	46.90	0.001
7	Тростниковые, осоковые, очеретниковые участки, часто обводненные	736.33	16.37	0.05
8	Березовые/сосновые кустарничковые сфагновые участки или со значительным участием сфагнума	243.98	5.42	0.03
Общая площадь			4498.087	
Заячий Отрог				
1	Участки открытого торфа с отдельными кочками пушицы влагалищной и пятнами политрихума	143.76	4.60	0.1
2	Пушицево-политриховые участки	24.35	0.78	0.13
3	Кустарничково-политриховые участки с пушицей влагалищной	481.07	15.41	0.08
5	Березово/сосново-пушицево-политриховые участки с кустарничками (преимущественно вереском)	520.22	16.66	0.11
6	Лесные сообщества с преобладанием березы и/или сосны злаковые или зеленомошные	1239.67	39.70	0.001
7	Тростниковые, осоковые, очеретниковые участки, часто обводненные	125.63	4.02	0.05
8	Березовые/сосновые кустарничковые сфагновые участки или со значительным участием сфагнума	267.80	8.58	0.03
9	Луговые сообщества	87.00	2.79	0.53
Общая площадь			3122.483	

группа ассоциаций растительности (под номером 4) не выделялась на картах при данном масштабе, так как занимает незначительные площади, но была встречена при описании растительного покрова осушенных торфяников.

Исходя из анализа площадей растительных сообществ и средней частоты пожаров, можно сделать вывод, что наиболее пожароопасным участком является Малодубровское, так как наиболее часто горящие сообщества, такие как пушицево-политриховые с частотой 0.13, березово/сосново-пушицево-политриховые участки с кустарничками (преимущественно вереском) с частотой 0.11 занимают 7.1 и 25% от общей площади соответственно, что гораздо больше, чем на других участках.

Корреляционный анализ обилия видов болотных сообществ и характеристик пожаров показал, что с частотой пожаров значимую положительную корреляцию обнаруживает обилие пушицы влагилистной и политрихума сжатого, а значимую отрицательную — обилие видов кустарничков.

Проведенный анализ зависимости параметров пожаров (частота, длительность, время восстановления после даты последнего пожара) с группами ассоциаций растительности в целом показал слабую взаимосвязь (рис. 5).

По полученным данным индикации частоты пожаров с группами ассоциаций растительности были составлены карты частоты пожаров групп растительных сообществ на каждый участок. Частота пожаров в пределах каждого сообщества рассчитывалась в долях от всего периода наблюдений — 38 лет (табл. 3).

Из анализа табл. 3 можно сделать вывод, что выделенные группы ассоциаций растительности связаны с параметрами прошедших пожаров следующим образом:

1 — участки открытого торфа с отдельными кочками пушицы влагилистной, пятнами политрихума, возникающие после пожаров и сохраняющиеся в таком состоянии до 5 лет;

2 — пушицево-политриховые участки возникают при частых пожарах; длительность их существования после пожара до 12 лет;

3 — кустарничково-политриховые участки с пушицей влагилистной возникают в условиях более редких пожаров, но могут оставаться довольно долго в таком состоянии;

4 — осоково/тростниково-политриховые участки возникают в условиях редких пожаров;

5 — березовые/сосновые пушицево-политриховые участки с кустарничками (преимущественно вереском) также возникают в условиях частых пожаров;

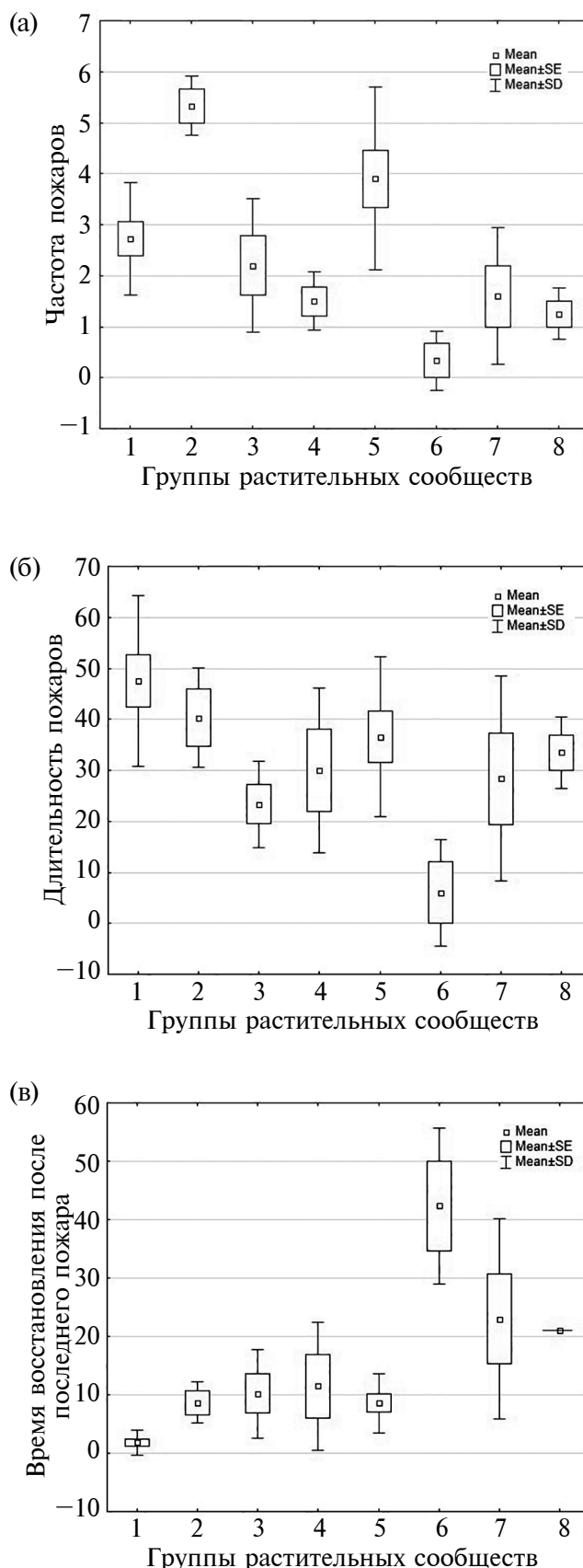


Рис. 5. Графики корреляций растительных сообществ с: а — частотой пожаров, б — длительностью пожаров, в — временем после последнего пожара.

- 6 – лесные сообщества с преобладанием березы и/или сосны злаковые или зеленомошные характерных для участков, на которых пожары редки и были давно;
- 7 – тростниковые, осоковые, очеретниковые, ивовые участки, часто обводненные характерные для участков с редкими пожарами;
- 8 – березовые/сосновые кустарничковые сфагновые участки или со значительным участием сфагнума возникают в условиях редких пожаров;

9 – луговые участки поддерживаются в таком состоянии при очень частых (вплоть до ежегодных пожаров).

Таким образом, лесные участки горят достаточно редко, как и сильно обводненные тростниковые и сфагновые. Участки открытого торфа с отдельными кочками пушицы или частично занятые политриховыми мхами горят чаще всего.

Соответственно, можно сделать вывод – если на территории представлены торфяные пустоши с редким березовым древостоем, кочками

Таблица 3. Связь групп ассоциаций растительности с параметрами прошедших пожаров

№	Группы ассоциаций растительности	Средняя частота пожаров	Средняя длительность пожаров (дни)	Среднее время, прошедшее после последнего пожара (год)
1	Участки открытого торфа с отдельными кочками пушицы влагищной, пятнами политрихума	0.1	40	2
2	Пушицево-политриховые участки	0.13	40	9
3	Кустарничково-политриховые участки с пушицей влагищной	0.08	25	12
4	Осоково/тростниково-политриховые	0.05	30	12
5	Березовые/сосновые пушицево-политриховые участки с кустарничками (преимущественно вереском)	0.11	37	9
6	Лесные сообщества с преобладанием березы и/или сосны злаковые или зеленомошные	0.001	6	>40
7	Тростниковые, осоковые, очеретниковые, ивовые участки, часто обводненные	0.05	28	23
8	Березовые/сосновые кустарничковые сфагновые участки или со значительным участием сфагнума	0.03	34	21
9	Луговые участки	0.53	30	1

Таблица 4. Процент площади ключевых торфяников с различной частотой пожаров, оцененной с помощью метода индикации

Характерная частота пожаров	Ключевые торфяники		
	Малодубровское	Гладкий Мох	Заячий Отрог
	% от общей площади		
пожары не встречаются	13.35	32.04	43.35
один раз в 30 лет	47.33	60.72	33.26
один раз в 15 лет	7.06	6.03	11.88
один раз в 10 лет	5.39	0.74	6.79
один раз в 7 лет	14.98	0.47	4.64
один раз в 6 лет	2.40	—	0.08
один раз в 5 лет	9.49	—	—

пушицы, то пожар на этих территориях происходит не менее чем один раз в 5 лет. Если на торфянике произрастают сообщества со сфагновым моховым ярусом или он залит слоем воды, поверх которого поднимаются густые заросли тростника, то пожар на этих территориях происходит не чаще чем один раз в 20 лет.

Приведенные выше сообщества в целом можно выстроить в сукцессионные ряды. Однако эти ряды будут индивидуальные для каждого торфяного массива, так как пожары, имеющие разную длительность и частоту, приводят к разнообразным изменениям экотопов, а, следовательно, и растительных сообществ. В качестве примера можно представить сукцессионный ряд на торфяном массиве Малодубровское:

1 – участки открытого торфа – пушицево-политриховые участки – березовые/сосновые пушицево-политриховые участки с кустарничками;

2 – участки открытого торфа – кустарничково-политриховые участки – березовые/сосновые пушицево-политриховые участки с кустарничками.

Первые возникают при длительных пожарах, вторые – в условиях менее длительных пожаров.

В соответствии с разработанной методикой, для выделенных групп ассоциаций растительности были построены карты частоты пожаров для ключевых торфяников (рис. 6). Разработанная методика позволяет проводить суммарную оценку торфяников по частоте пожаров, полученную с помощью методов индикации.

В табл. 4 приведена частота пожаров, характерная для разных участков ключевых торфяников. Из анализа данных, представленных в табл. 4, можно сделать вывод, что торфяник Малодубровское имеет наименьший процент площади, подверженной пожарам. Также он имеет около 27% площади, которые горят раз в 10 лет и чаще. Для торфяников Гладкий Мох и Заячий Отрог можно выделить от 50 до 70% площади, которые горят с частотой раз в 20–30 лет. Однако на этих торфяниках также есть участки, которые горят раз в 10 лет и чаще.

Можно ожидать, что при условии, что характер использования торфяников не изменится, то частота пожаров для этих торфяников останется такой же, как за предыдущие 30 лет наблюдений. Соответственно, частота пожаров является показателем их пожароопасности.

ОБСУЖДЕНИЕ

Полученные результаты корреляции групп ассоциаций растительности с показателями возгораний показали, что в целом разработанная методика может эффективно применяться в дальнейших исследованиях по прогнозу и оценке пожароопасности, однако требуется дальнейшее



Рис. 6. Карты частоты пожаров (в долях) за весь период наблюдений: а – Малодубровское, б – Гладкий Мох, в – Заячий Отрог.

ее развитие и более полное изучение взаимосвязей частоты пожаров на осушенных торфяниках с преобладающими на них типами растительных сообществ. Одними из важнейших показателей, влияющих на частоту возгораний, являются свойства и состав торфяных грунтов, что подробно описано в работе А.И. Филькова [22]. Повышенная возгораемость торфа обусловлена его пористой структурой, малой плотностью и наличием в составе кислорода до 40%. Степень пожароопасности зависит от ботанического состава торфа, степени его разложения и влажности. На исследуемых участках средняя влажность торфа варьируется в диапазоне от 80 до 90%, что является достаточно высоким показателем, и, казалось бы, должно снижать вероятность возгорания. Однако в работе С.Н. Грицкова и Г.Н. Исакова [4] говорится, что пористость влажного торфа приводит к фильтрационному режиму горения, влажность может сыграть положительную роль в процессе газификации, так как нагретые частицы углерода при взаимодействии с водяным паром выделяют водород и углекислый газ. На частоту самовозгораний также влияет вид и тип торфа. Так, например, верховой пушицевый торф имеет опасную степень самовозгорания [6], что в целом совпадает с полученными данными.

Также важными показателями пожароопасности являются теплофизические свойства торфа, на их основе строятся математические модели, описывающие процессы возгорания и горения торфа, они могут быть применены к оценке пожароопасности [8].

Н.П. Ахметьева [2] отмечает, что восстановление растительности одного из ключевых проанализированных торфяников после пожара происходило интенсивно, особенно в первые 2–3 года; через 5 лет сформировалось березово-ивово-пушицевое сообщество с участием ольхи и осины; на другом ключевом участке интенсивность зарастания ниже, с незначительным обилием отмечается сосна. В целом этот вывод соотносится с нашими результатами.

Стоит отметить, что существует классификация природной пожарной опасности лесов, утвержденная Федеральным агентством лесного хозяйства [19]. В основе классификации лежат типы лесов, оцененные по степени их пожарной опасности от I (высокая опасность — хвойные молодняки, места сплошных рубок по суходолам, сосняки лишайниковые и вересковые, сильно поврежденные древостои, сухостои) до V (опасность отсутствует — ельники, березняки, осинники, долгомошники, ольшаники). Данные классы пожароопасности частично применимы к оценке нарушенных торфяников, так как на таких участках встречаются лесные сообщества.

Однако процесс горения торфа очень специфичен, в первую очередь потому, что торф может

гореть долгое время в условиях отсутствия кислорода. По мнению авторов должна быть разработана универсальная классификация природной пожарной опасности нарушенных торфяников, которой в настоящее время не существует.

ВЫВОДЫ

В результате проведенного исследования разработан методический подход, позволяющий с помощью анализа данных дистанционного зондирования оценивать частоту пожаров на торфяниках и проводить их картирование.

Характер распространения пожара, его тип и вероятность можно оценить с помощью физических факторов, в том числе измеренных параметров торфяного грунта. Однако проведение таких измерений достаточно трудоемко, поэтому использование геоиндикационных подходов является перспективным решением.

Показано, что индикационные взаимосвязи между частотой пожаров и состоянием растительного покрова достаточно сильны, соответственно, можно использовать тип растительного покрова как индикатор частоты пожаров на торфянике.

Можно сделать вывод, что если на территории представлены торфяные пустоши с редким березовым древостоем, кочками пушицы, то пожар на этих территориях происходит не менее чем один раз в 5 лет. Если на территории представлены сфагновые и/или тростниковые обводненные ассоциации, то пожар на них происходит не чаще чем один раз в 20 лет.

Проведена апробация разработанной методики для ключевых торфяников. В результате апробации было показано, что торфяник Малодубровское имеет около 27% площади, которые горят раз в 10 лет и чаще. Для торфяников Гладкий Мох и Заячий Отрог можно выделить от 5 до 70% площади, которые горят с частотой раз в 20–30 лет. Однако на этих торфяниках также есть участки, которые горят раз в 10 лет и чаще.

Публикация осуществлена при финансовой поддержке Всероссийской общественной организации «Русское географическое общество».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ахметьева Н.П., Лапина Е.Е., Кудряшова В.В. Влажность торфа и возникновение пожаров на болотах // Мелиорация и природная среда. 2014. № 3. С. 26–29.
2. Ахметьева Н.П., Михайлова А.В., Федорова Л.П. Восстановление растительного покрова на начальной стадии зарастания гарей на выработанных торфяниках // Лесоведение. 2018. № 2. С. 119–129.
3. Вомперский С.Э., Глухова Т.В., Смагина М.В., Ковалев А.Г. Условия и последствия пожаров в сосняках на осушенных болотах // Лесоведение. 2007. № 6. С. 35–44.

4. Грицков С.Н., Исаков Г.Н. Моделирование и мониторинг ландшафтных торфяных пожаров // *Вестник кибернетики*. 2018. № 2. С. 175–182.
5. Гришин А.М. О математическом моделировании торфяных пожаров // *Вестник Томского государственного университета*. Сер. Математика и Механика. 2008. № 3(4) С. 85–94.
6. Евграфов А.В. Мониторинг уровня грунтовых вод с целью предупреждения лесоторфяных пожаров // *Природообустройство*. 2012. № 1. С 19–22.
7. Ильясов Д., Сиринов А., Макарова Л. и др. ГИС-картографирование торфяных болот и антропогенно измененных торфяников Рязанской области // *Вестник РГА-ТУ*. 2019. № 1 (41). С. 30–38.
8. Кулеш Р.Н., Субботин А.Н. Математическое моделирование тепломассопереноса при воспламенении торфа // *Известия Томского политехнического университета*. Инжиниринг георесурсов. 2013. Т. 323. № 4. С. 85–90.
9. Маслов А.А., Гульбе Я.И., Макаров Д.А., Сиринов А.А. Восстановление допожарных характеристик лесных насаждений на гари по данным космической съемки и полевых наблюдений // *Лесохозяйственная информация*. 2017. № 4. С. 73–83.
10. Маслов Б.С. Вопросы истории мелиорации торфяных болот и развитие науки // *Вестник ТГПУ*. 2008. Выпуск 4 (78). С. 64–69.
11. Медведева М.А., Возбранная А.Е., Барталев С.А., Сиринов А.А. Оценка состояния заброшенных торфоразработок по многоспектральным спутниковым изображениям // *Исследование земли из космоса*. 2011. № 5. С. 80–88.
12. Минаева Т.Ю., Сиринов А.А. Биологическое разнообразие болот и изменение климата // *Успехи современной биологии*. 2011. Т. 131. № 4. С. 393–406.
13. Орлов Т.В., Шахматов К.Л. Анализ эффективности работ по вторичному обводнению торфяников Тверской области с помощью данных дистанционного зондирования // *Геоэкология*. 2020. № 6. С. 74–82.
14. Панов В.В. Восстановление торфяных болот: учеб. пос. Томск: Издательство Томского государственного педагогического университета, 2006. 70 с.
15. Панов В.В. Восстановление торфяных болот: учеб. курс. Тверь-Москва: Изд-во “Триада”, 2021. 184 с.
16. Панов В.В. О роли гидростатики в развитии торфяного болота // *Труды Инсторфа*, 2011. № 3 (56).
17. Панов В.В. Перспективное использование выработанных торфяных болот. Тверь: Изд-во “Триада”, 2013. 218 с.
18. Панов В.В., Цымлякова С.С. Пространственная структура пожаров и гари на техногенно нарушенных торфяных болотах // *Известия РГО*. 2013. Т. 145. Вып. 1. С. 80–90.
19. Приказ об утверждении классификации природной пожарной опасности лесов и классификации пожарной опасности в лесах в зависимости от условий погоды от 5 июля 2011 года № 287.
URL: <https://docs.cntd.ru/document/902289183>.
20. Сонюшкин А.В., Шумилин А.В., Кучейко А.А. Спутниковый мониторинг пожаров в России летом 2010 г. // *Земля из космоса – наиболее эффективные решения*. 2010. № 7. С. 56–59.
21. Субботин А.Н. Распространение торфяного пожара при разных условиях тепломассообмена с внешней средой // *Пожаровзрывобезопасность*. 2007. Т. 16. № 5. С. 42–49.
22. Фильков А.И. Физико-математическое моделирование возникновения природных пожаров. Томск: Издательский Дом ТГУ, 2014. 276 с.
23. Atwood E.C., Enghart S., Lorenz E., et al. 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). 2016. PLoS ONE11(8): e0159410.
<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0159410>
24. Krishna Prasad Vadrevu, Eaturu Anuradha, K.V.S. Badarinath. Fire risk evaluation using multicriteria analysis – a case study // *Environ Monit Assess*. 2010. 166:223–239.
<https://doi.org/10.1007/s10661-009-0997-3>
25. Sheriza M. Razali, Ahamad Ainuddin Nuruddin, Ismail A. Malek, Norizan A. Patah. Forest fire hazard rating assessment in peat swamp forest using Landsat thematic mapper image // *J. of Applied Remote Sensing*. 2010. V. 4. 043531. 1–7 p.
<https://doi.org/10.1117/1.3430040>
26. Tansey K., Beston J., Hoscolo A. et al. Relationship between MODIS fire hot spot count and burned area in a degraded tropical peat swamp forest in Central Kalimantan, Indonesia // *Journal of geophysical research*. V. 113. D23112. 1–8 p.
<https://doi.org/10.1029/2008JD010717>. 2008.
27. Turetsky M.R., Amiro B.D., Bosch E., Bhattachi J.S. Historical burn area in western Canadian peatlands and its relationship to fire weather indices // *Global biogeochemical cycles*. 2004. V. 18. GB4014.
<https://doi.org/10.1029/2004GB002222>
28. Wilkinson S.L., Verkaik G.J., Moore P.A., Waddington J.M. Threshold peat burn severity breaks evaporation-limiting feedback // *Ecohydrology*. 2019. 13(1): e2168. <https://doi.org/10.1002/eco.2168>
29. Xinyan Huang A., Guillermo Rein. Computational study of critical moisture and depth of burn in peat fires // *International Journal of Wildland Fire*. 2015. 24. P. 798–808.

GEOBOTANICAL INDICATION OF THE DRAINED STATE OF DISTURBED PEATLANDS FOR FIRE HAZARD ASSESSMENT

T. V. Orlov^{1, #}, M. V. Arkhipova¹, V. V. Bondar¹, R. O. Razumovsky¹,
V. A. Smagin², K. L. Shakhmatov³

¹*Sergeev Institute of Environmental Geoscience, Russian Academy of Sciences,
Ulansky per. 13, bld. 2, Moscow, 101000 Russia*

²*Komarov Botanical Institute, Russian Academy of Sciences,
ul. Professora Popova 2, St. Petersburg, 197376 Russia*

³*Tver State Technical University, ul. Zhelyabova 33, Tver, 170100 Russia*

[#]*E-mail: tim.orlov@gmail.com*

The issue of fire hazard in abandoned peatlands is particularly relevant nowadays, as the negative consequences of peatland fires lead to deterioration in public health and the functioning of the entire infrastructure system. The problem of predicting and assessing peat burning is a global one, with numerous studies being conducted not only in Russia but also abroad, i.e., in CIS countries, Southeast Asia, Canada, and the United States. However, the relationship between vegetation communities and the frequency of fires receives insufficient attention. The study is devoted to assessing the condition of degraded peatlands using geobotanical indicators of peat soils on the example of peatlands in Leningrad and Pskov regions. Three key objects were selected, which represent abandoned peat deposits. The methodology for assessing the fire hazard of peatlands is based on a comprehensive approach, including the creation of large-scale vegetation maps using a series of satellite images and field geobotanical descriptions, and the analysis of fires on objects for the period from 2000 to 2023 using satellite images and thermal data. As a result of the study, maps of fire frequency and duration and maps of natural-territorial complexes for each plot were obtained. The analysis of the relationship between vegetation communities and the frequency of fires showed that the species composition of the communities correlates relatively well with the time elapsed since the date of the last fire, and to a lesser extent with the duration of the fires. Indicative relationships between fire frequency and vegetation cover are quite strong, so the type of vegetation cover can be used as an indicator of fire frequency on a peatland. On territories with peat bogs with a sparse birch forest, fire occurs at least once every 5 years. On territories with sphagnum associations and reed swamp associations, fire occurs no more than once every 20 years.

Keywords: fire hazard, peatlands, geobotanical indicators, North-Western federal district

REFERENCES

1. Akhmet'yeva, N.P., Lapina, E.E., Kudryashova, V.V. [Peat moisture and the consequences of fires in swamps]. *Melioratsiya i prirodnaya sreda*, 2014, no. 3, pp. 26–29. (in Russian)
2. Akhmet'yeva, N. P. Mikhailova, A.V., Fedorova, L.P. [Restoration of vegetation cover at the initial stage of overgrowth of burnt areas on exhausted peatlands]. *Lesovedenie*, 2018, no. 2, pp. 119–129. (in Russian)
3. Vompersky, S.E., Glukhova, T.V., Smagina, M.V., Kovalev, A.G. [Conditions and consequences of peatland fires in drained bogs]. *Lesovedenie*, 2007, no.6, pp. 35–44. (in Russian)
4. Gritskov, S.N., Isakov, G.N. [Modeling and monitoring of landscape peatland fires]. *Vestnik kibernetiki*, 2018, no. 2, pp. 175–182. (in Russian)
5. Grishin, A.M. [Mathematical modeling of peatland fires]. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Ser. Matematika i mekhanika*, 2008, no 3(4), pp. 85–94. (in Russian)
6. Evgrafov, A.V. [Monitoring of groundwater levels for the prevention of forest peatland fires]. *Prirodoobustroistvo*, 2012, no. 1, pp. 19–22. (in Russian)
7. Il'yasov, D, Sirin, A., Makarova, L., Bukin, A., Korablina, N. [GIS mapping of peat bogs and anthropogenically modified peatlands in the Ryazan region]. *Vestnik RGATU*, 2019, no. 1 (41), pp. 30–38. (in Russian)
8. Kulesh, R.N., Subbotin, A.N. [Mathematical modeling of heat and mass transfer during peat ignition] *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov*, 2013, vol. 323, no. 4, pp. 85–90. (in Russian)
9. Maslov, B.S. [Questions of the history of peat bog reclamation and the development of science]. *Vestnik TGPU*, 2008, issue 4 (78), pp. 64–69. (in Russian)
10. Maslov, A.A., Gul'be, Ya. I., Makarov, D.A., Sirin, A. A. [Restoration of pre-fire characteristics of forest plantations in burnt areas according to satellite imagery and field observations]. *Lesokhozyaistvennaya informatsiya*, 2017, no. 4, pp. 73–83. (in Russian)
11. Medvedeva, M.A., Vozbrannaya, A.E., Bartalev, S.A., Sirin, A.A. [Assessment of the condition of abandoned peat mines using multispectral satellite images]. *Issledovaniya Zemli iz kosmosa*, 2011, no. 5, pp. 80–88. (in Russian)
12. Minaeva, T. Yu., Sirin, A.A. [Biological diversity of swamps and climate change]. *Uspekhi sovremennoi biologii*, 2011, vol. 131, no. 4. pp. 393–406. (in Russian)
13. Orlov, T.V., Shakhmatov, K.L. [Analysis of the effectiveness of work on secondary watering of peatlands in the Tver region using remote sensing data]. *Geoekologiya*. 2020, no. 6, pp. 74–82. (in Russian)
14. Panov, V.V. [Restoration of peat bogs: Textbook]. Tomsk, Tomsk State Pedagogical University Publ., 2006, 70 p. (in Russian)
15. Panov, V.V. [Restoration of peat bogs: training course]. Tver-Moscow, Triada Publ., 2021, 184 p. (in Russian)
16. Panov, V.V. [On the role of hydrostatics in the development of a peat bog]. *Trudy Instorfa*, 2011, no. 3 (56). (in Russian)
17. Panov, V.V. [Prospective use of exhausted peat bogs]. Tver, Triada Publ., 2013, 218 p. (in Russian)
18. Panov, V.V., Tsymlyakova, S.S. [Spatial structure of fires and burning in technologically disturbed peat bogs]. *Izvestiya RGO*, 2013, vol. 145, no. 1, p. 80–90. (in Russian)

19. [Order on approval of the classification of wildfire hazard in forests and the classification of fire hazard in forests depending on weather conditions dated July 5, 2011, no. 287]. URL: <https://docs.cntd.ru/document/902289183>.
20. Sonyushkin, A.V., Shumilin, A.V., Kucheiko, A.A. [Satellite monitoring of fires in Russia in the summer of 2010]. *Zemlya iz kosmosa – naibolee effektivnye resheniya*, 2010, no. 7, pp. 56–59. (in Russian)
21. Subbotin, A.N. [Propagation of a peat fire under different conditions of heat and mass exchange with the external environment]. *Pozharovzryvobezopasnost'*, 2007, vol. 16, no. 5, pp. 42–49. (in Russian)
22. Fil'kov, A.I. [Physico-mathematical modeling of the occurrence of natural fires]. Tomsk, TGU Publ., 2014, 276 p. (in Russian)
23. Atwood, E.C., Enghart, S., Lorenz, E., Halle, W., Wiedemann, W., Siegert, F. 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), 2016, PLoS ONE 11(8): e0159410. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0159410>
24. Krishna Prasad Vadrevu, Eaturu Anuradha, K.V.S. Badarinath. Fire risk evaluation using multicriteria analysis—acasestudy. *Environ Monit Assess.*, 2010, 166:223–239. <https://doi.org/10.1007/s10661-009-0997-3>
25. Sheriza, M. Razali, A. Ainuddin Nuruddin Ismail A. Malek, Norizan A. Patah. Forest fire hazard rating assessment in peat swamp forest using Landsat thematic mapper image. *Journal of Applied Remote Sensing*, 2010, vol. 4, 043531. 1–7 p.
26. Tansey, K., J. Beston, A. Hoscolo, S.E. Page, and C.U. Paredes Herna'ndez. Relationship between MODIS fire hot spot count and burned area in a degraded tropical peat swamp forest in Central Kalimantan, Indonesia. *Journal of geophysical research*, 2008, vol. 113, pp. 1–8 p. D23112. <https://doi.org/10.1029/2008JD010717>.
27. Turetsky, M.R., Amiro, B.D., Bosch, E. and Bhatti, J.S. Historical burn area in western Canadian peatlands and its relationship to fire weather indices. *Global biogeochemical cycles*, 2004, vol. 18. GB4014. <https://doi.org/10.1029/2004GB002222>
28. Wilkinson, S.L., Verkaik, G.J., Moore, P.A., Waddington, J.M. Threshold peat burn severity breaks evaporation-limiting feedback. *Ecohydrology*, 2019, no. 13(1): e2168. <https://doi.org/10.1002/eco.2168>
29. Xinyan Huang A., Guillermo Rein. Computational study of critical moisture and depth of burn in peat fires. *International Journal of Wildland Fire*, 2015, no. 24, pp. 798–808. <https://doi.org/10.1071/WF14178>