

Научная статья
УДК 630.431.6
EDN PEVOQF
DOI 10.24419/LHI.2304-3083.2023.4.07

Влияние уровня грунтовых вод и влажности на развитие торфяного пожара

Григорий Валерьевич Куксин

Аннотация. Исследование посвящено проблеме, связанной с тушением торфяных пожаров, представляющих серьезную угрозу людям, объектам инфраструктуры и окружающим природным ландшафтам. Рассмотрены различные методы ликвидации очагов горения (тления). В ходе сравнительного анализа выявлены их достоинства и недостатки. Приведены результаты научных трудов, посвященных данной тематике. В условиях характерного торфяного пожара проведен сбор экспериментальных данных, позволяющих научно обосновать уровни грунтовых вод и влажности торфа, достижение которых позволяет локализовать или ликвидировать торфяной пожар методами подтопления. Работа направлена на установление параметров и условий, в которых развивается торфяной пожар. Представлены экспериментальные данные по измерениям влажности торфа в шурфах на различных глубинах до и после тушения подтоплением. Проведенное исследование показало, что в рассмотренных случаях очаги тления торфа не развивались вертикально (в глубину) с расстояния 50–70 см от уровня грунтовых вод. Критическим уровнем влажности, при котором тление торфа останавливалось, был уровень в 400 % массы сухого вещества; скорость горизонтальной фильтрации воды в горящие торфяные карты из заполняемых каналов составила 0,2–0,3 м/мин; соотношение объемов необходимой для подтопления горящей торфяной карты воды и объема пустого пространства в заполняемых водой каналах – 4:1. В ходе исследования выявлено, что во всех рассматриваемых очагах наблюдается усиление поверхностного тления и переход его в открытое пламенное горение перед окончательным затуханием очагов при подъеме уровня грунтовых вод. Предполагаем, что такое явление вызвано воздействием пара, который образуется при контакте воды с нижерасположенными зонами тления. На основании результатов предварительного исследования сделан вывод о недостаточной изученности влияния очага тления на примыкающие слои торфа, особенно при горизонтальном развитии, а также сформулированы задачи для следующего этапа исследования с целью достижения поставленной цели.

Ключевые слова: торфяной пожар, уровень грунтовых вод, влажность торфа, подтопление.

Для цитирования: Куксин Г.В. Влияние уровня грунтовых вод и влажности на развитие торфяного пожара. – Текст : электронный // Лесохозяйственная информация. 2023. № 4. С. 71–84. DOI 10.24419/LHI.2304-3083.2023.4.07. <https://elibrary.ru/pevoqf>

Original article

EDN PEVOQF

DOI 10.24419/LHI.2304-3083.2023.4.07

Influence of Groundwater Level and Humidity on the Development of Peat Fire

Grigory V. Kuksin

Abstract. The study is dedicated to the issues of extinguishing peat fires, which pose a serious threat to people, infrastructure and landscapes. The article discusses various methods for eliminating the peat fire points. In the course of a comparative analysis, their advantages and disadvantages were identified. The results of scientific researches dedicated to the issues under consideration are described. Under the conditions of a typical peat fire, experimental data were collected to scientifically substantiate the groundwater level and peat moisture content, which make it possible to localize or eliminate a peat fire with flooding. The study aims to identify the parameters of the conditions in which a peat fire develops. The article presents experimental data on measurements of peat moisture content in pits at various depths before and after flooding. The study showed that for the studied cases, peat fire points ceased to develop vertically (in depth) starting from a distance of 50–70 cm from the groundwater level below them. The critical moisture content at which peat smoldering stopped was 400 % of the dry matter mass. The horizontal filtration rate from the channels being filled with water into the burning peat field was 0.2–0.3 m/min. The ratio of the volumes of water necessary for flooding the burning peat field to the volume of empty space in the channels was 4:1. The study revealed that in all observed cases surface smoldering increased and open flame appeared before the fire points went out along with the moisture content growth. We suggest that this phenomenon is caused by steam, which is formed when water contacts with the lower smoldering zones. Based on the results of the preliminary study, a conclusion was made about the insufficient knowledge of the influence of the fire points on the adjacent peat layers, especially during horizontal fire point development, and the tasks for the next stage of the study were identified.

Key words: peat fire, groundwater level, peat moisture content, flooding.

For citation: Kuksin G. Influence of Groundwater Level and Humidity on the Development of Peat Fire. – Text: electronic // Forestry information. 2023. № 4. P. 71–84. DOI 10.24419/LHI.2304-3083.2023.4.07. <https://elibrary.ru/pevoqf>

Введение

В условиях изменения климата и роста числа случаев аномально жаркой погоды повышается угроза жизни и здоровью людей от торфяных пожаров, которые могут стать источником возникновения других видов пожаров как в лесных насаждениях, так и в населенных пунктах. Практически все модели, описывающие будущие противопожарные режимы для российских лесов, прогнозируют существенный рост и увеличение интенсивности торфяных пожаров [1, 2].

Условия возникновения и развития очага тления при торфяном лесном пожаре, а также общие подходы к остановке его вертикального и горизонтального развития изложил в своих работах еще Е.С. Арцыбашев [3]. В советский период свойствам торфа как топлива было посвящено много научных работ, которые легли в основу методов получения более качественного (прежде всего более сухого) топлива [4, 5], но эти работы затрагивали торф в первую очередь как продукт добычи и переработки, а не как природный лесной горючий материал. При этом известно, что торф – мощный водопоглотитель: 1 кг сухого вещества торфа может удержать до 15 кг воды, т. е. колебания его возможной влажности лежат в очень широком диапазоне [6].

Более подробные работы, посвященные выяснению того, как возникает и развивается тление торфа в различных видах торфяных почв, проведены коллективами ученых из США и Канады [7–9]. Экспериментально подтверждено, что почвы с большим содержанием органики и меньшим содержанием минеральных компонентов могут гореть при относительно высокой влажности. Рекордные значения влажности, при которой очаги способны развиваться горизонтально, выявлены в слаборазложившемся торфе: устойчивое тление происходило при влажности образцов около 200 % сухой массы, неустойчивое тление было описано при влажности до 300 % [8]. Однако в перечисленных исследованиях приведены результаты только в отношении небольших по массе и объему образцов почв в лабораторных условиях. Этого недостаточно для моделирования влияния

теплообмена в горящих залежах торфа в условиях действующего пожара, при котором происходит разогрев, подсушка на примыкающих участках, идут процессы пиролиза, образования слоев торфяного кокса и т.д. Таким образом, в экспериментах отсутствовали сведения о влажности, до уровня которой необходимо довести примыкающий к очагам тления торф, чтобы препятствовать дальнейшему развитию пожара как вертикально (в глубину), так и горизонтально.

Ученые всего мира в рамках проектов, направленных на сохранение водно-болотных угодий и борьбу с изменением климата под влиянием антропогенного фактора, проводят исследования по определению оптимального уровня влажности торфа для сохранения и восстановления ранее нарушенных болот, а также такого уровня грунтовых вод, при котором торфяники не будут деградировать и превращаться в источник парниковых выбросов [10–12]. Например, для экваториальных торфяников Индонезии связь между процессами в торфянике и уровнем воды изучали с использованием подхода гидропочвенного моделирования на основе построенных цифровых моделей рельефа для нарушенных и прилегающих к ним относительно нетронутых торфяников в Центральном Калимантане [13]. В то же время отсутствуют надежные данные о том, как ведут себя очаги тления на уже возникших пожарах с учетом их собственного воздействия на окружающие участки [14].

Цель работы – теоретическое и экспериментальное исследование, направленное на повышение эффективности и совершенствование методов тушения торфяных пожаров. Задачи исследования:

- 1) на основании практического опыта тушения указанных пожаров и научных трудов различных исследователей идентифицировать недостатки и достоинства методов тушения;
- 2) получить необходимые данные для последующего создания научно обоснованных методик тушения торфяных пожаров подтоплением, позволяющих существенно снизить временные и материальные затраты на ликвидацию очагов горения (тления):

- ✓ в натуральных условиях (на болоте, осушенном под фрезерную добычу торфа, в условиях действующего многоочагового торфяного пожара) установить соотношение глубины развития торфяных очагов и уровня грунтовой воды;
- ✓ определить влажность торфа, при которой прекращается вертикальное развитие очага его горения (тления);
- ✓ оценить объем воды, необходимый для прекращения горения торфа методом подтопления, и временной период, в течение которого будет обеспечен подъем грунтовых вод до необходимого уровня после заполнения водой осушительных каналов.

Объекты и методы исследования

В ходе исследования применен сравнительный и описательный методы анализа способов тушения торфяных пожаров, дана их характеристика, а также приведены результаты научных трудов исследователей, посвятивших свои работы рассматриваемой проблеме.



Рис. 1. Торфяной пожар в окрестностях оз. Люкосаргское. Август 2023 г.

Для проведения исследования был выбран один из типичных торфяных пожаров (рис. 1). Место пожара: Ленинградская обл., Кировский район, бывшие торфоразработки к западу от озера Люкосаргское. Пожар возник на болоте, осушенном под фрезерную добычу, на участке, где разрабатывали залежь с преобладанием верхового торфа (расстояние между картовыми каналами около 20 м). Торфяной пожар развился вследствие низового лесного пожара; очаги тления торфа расположены в границах площади, пройденной огнем. Размещение очагов характерно для аналогичных пожаров: практически все участки с тлением почвы находятся по краям осушительных каналов, на возвышенных участках или по краям торфяных очагов прошлых лет. Образование очагов сопровождается гибелью и распадом всего древостоя. Общая площадь пожара на момент начала исследования составляла 75 га, очаги тления занимали около 10 % пройденной огнем площади, из них наибольшую угрозу дальнейшему распространению пожара представляли очаги, расположенные на его юго-западной кромке.

Для предварительного определения площади пожара (площади, пройденной огнем), а также отслеживания динамики его развития использовали космические снимки среднего пространственного разрешения Sentinel-2 MSI (20 м/пиксель) Европейского космического агентства, доступные через WMS-сервис, предоставляемый Sentinel-Hub¹. Границы пожара определяли методом визуального дешифрирования снимков [15] в комбинации каналов 11-8-2 и 4-3-2 при рабочем масштабе от 1:10 000 до 1:50 000. Для определения границ и площади, пройденной огнем, использовали инструменты картирования. Полученные данные сопоставляли со снимками высокого пространственного разрешения в открытых картографических сервисах для выбора оптимальной схемы тушения и установления мест натурных измерений на пожаре.

В ходе определения точных координат и точных отметок высот непосредственно на месте

¹ <https://www.sentinel-hub.com>, Sinergise Ltd.

пожара были использованы GNSS(RTK)-приемники (переносная базовая станция и ровер), измерения по высотам проводили в относительной системе координат без связи со стационарными базовыми станциями (рис. 2).

При обследовании пожара, выявлении и нанесении на карты и схемы очагов тления был использован беспилотный летательный аппарат с тепловизионной камерой. Для постобработки тепловых изображений применяли программу DJI Terra.

Измерение глубины очагов тления торфа проведено с использованием торфяных щупов-термометров.

Контроль за ходом подтопления под кронами деревьев и в завалах из упавших деревьев осуществляли с помощью тепловизионных камер FLIR, встроенных в смартфон Ulefone (рис. 3).

Пробы торфа взвешивали на электронных весах, для их упаковки использовали пластиковые контейнеры с крышками (рис. 4).

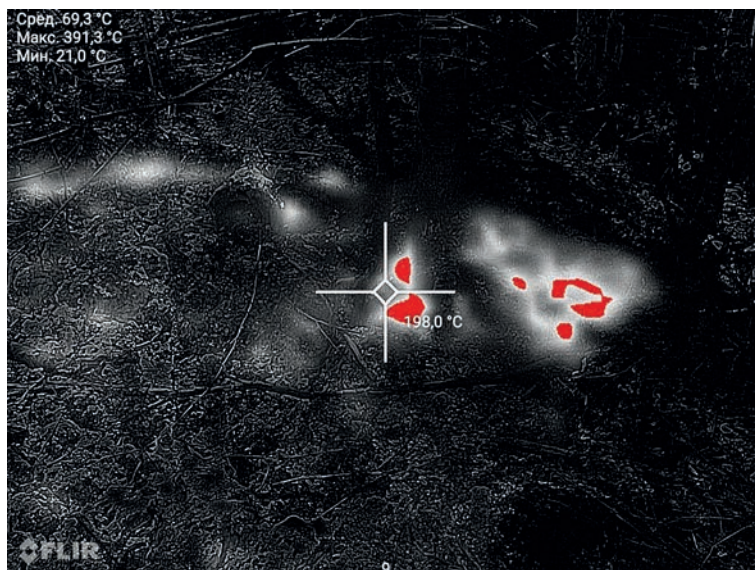


Рис. 3. КОНТРОЛЬ ТЕМПЕРАТУРЫ В ОЧАГАХ С ПОМОЩЬЮ РУЧНОГО ТЕПЛОВИЗОРА

Дополнительные измерения глубины забора проб торфа проведены с помощью мерной рейки (рис. 5).



Рис. 2. ИЗМЕРЕНИЕ ПОВЕРХНОСТИ РЕЛЬЕФА И ГЛУБИНЫ ОЧАГА С ПОМОЩЬЮ GNSS-ПРИЕМНИКА



Рис. 4. ОТБОР И ВЗВЕШИВАНИЕ ОБРАЗЦОВ ПОЧВЫ



Рис. 5. ИЗМЕРЕНИЕ УРОВНЯ ГРУНТОВОЙ ВОДЫ ВО ВРЕМЯ ТУШЕНИЯ ПОДТОПЛЕНИЕМ

Хронометраж подтопления, фильтрации воды и работы мотопомп проведен с помощью наручных часов и секундомера в смартфонах. В качестве дополнительных средств фото- и видеофиксации процессов при подтоплении применяли различные модели фотоловушек и экшн-камер.

Работы по созданию временных земляных перемычек проводили дистанционно управляемым

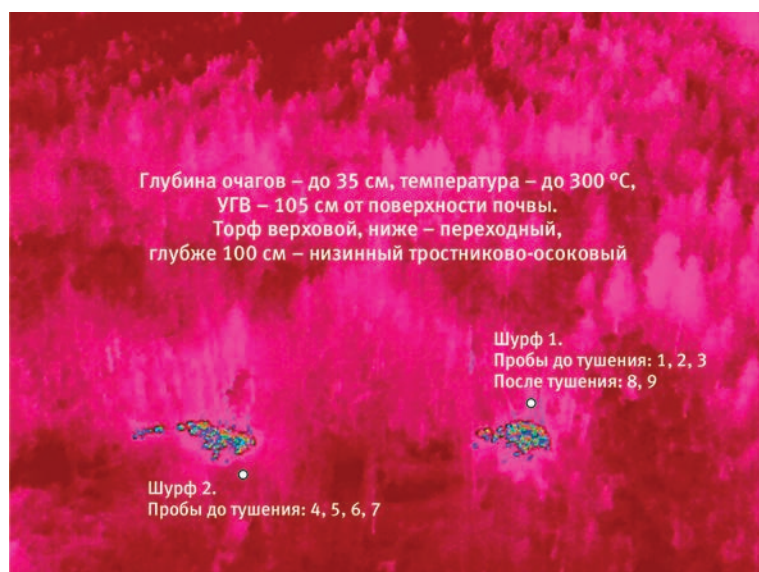


Рис. 6. СНИМОК С БЕСПИЛОТНОГО ВОЗДУШНОГО СУДНА В ИНФРАКРАСНОМ ДИАПАЗОНЕ В НАЧАЛЕ РАБОТ С НАЛОЖЕННЫМИ ДАННЫМИ О РАСПОЛОЖЕНИИ ШУРФОВ И НОМЕРАМИ ПРОБ ТОРФА

мини-трактором RoboGreen, оборудованным фронтальным погрузчиком и гидравлической лебедкой; перекачивание воды производилось плавающими мотопомпами РН-Mammoth-2400 по рукавам диаметром 150 мм.

До начала работ по тушению были измерены высоты поверхности почвы, верхние точки очагов, глубина очагов, уровень воды в каналах, уровень дна каналов. Кроме того, до начала работ по тушению была сделана «нулевая» съемка всей площади пожара тепловизионной камерой с беспилотника (рис. 6).

Около групп очагов, действующих по краям картовых каналов и на участках торфяных карт между каналами, были сделаны шурфы для отбора проб. Шурфы располагались на расстоянии около 1,5–2,0 м от кромок очагов, за границами явного влияния очагов тления на не тлеющий и еще холодный торф в шурфах (температура стенок шурфов контролировалась как ручными тепловизорами, так и щупами-термометрами). Участки шурфов подобраны соответственно лесорастительным характеристикам участков, пройденных торфяным пожаром. При определении конкретного места для шурфа выбирали точку, где, если бы пожар не был потушен, участок с шурфом был бы поглощен развивающимися очагами через несколько суток. Эти же шурфы в дальнейшем использовали в качестве водомерных скважин. В шурфах был измерен уровень грунтовой воды (простаивающая свободная вода). Ее уровень совпал с уровнем воды в ближайших картовых каналах. Пробы торфа были взяты с глубин, соответствующих тем, на которых торф тлеет в нижней части очагов и на которых он уже точно не тлеет даже под действующими очагами. Дополнительно для подтверждения корректности измерений и определения диапазона влажности в изучаемых условиях были взяты пробы с глубин, соответствующих зоне поверхностного (самого горячего) тления, т. е. вблизи поверхности почвы, а также пробы с глубины, близкой к уровню грунтовых вод.

До начала работ по подтоплению были измерены профили картовых каналов. Площадь сечения этих каналов с учетом их зарастания составила 1 м².

Участок для тушения методом подтопления был выбран таким образом, чтобы в него попали все группы действующих очагов торфяных пожаров, угрожавшие при своем развитии переходом огня на соседние торфяные поля. Общая площадь очагов тления в зоне проведения эксперимента составила около 1 га. Для того чтобы подтопление можно было провести в условиях дефицита воды, участок был отделен от остальной площади системой временных земляных дамб. Это позволило достаточно точно оценить объем пустых картовых каналов, предназначенных для заполнения водой при подтоплении. При этом следует учитывать, что, кроме картовых каналов, при подтоплении вода заполняет и выгоревшие торфяные очаги, оценить точный объем которых в полевых условиях очень сложно.

Работы по подтоплению проводили путем перекачивания плавающими мотопомпами воды из валового канала в перекрытые участки картовых каналов со скоростью около 4 500–4 600 л в 1 мин с небольшими перерывами для заправки мотопомп топливом. Фиксировалось только время эффективной работы мотопомп (время подачи воды).

После начала работ по подтоплению в водомерных скважинах регистрировали подъем уровня воды и время, которое требовалось для выравнивания уровня воды в заполняемых каналах и скважинах, а также температуру очагов. Кроме того, 2 раза в сутки проводили съемку всей площади пожара тепловой камерой с беспилотника.

Ликвидация тления была достигнута в течение 2 рабочих дней, включая работы по измерениям и окарауливанию. В работах участвовало до 5 чел.

В конце работ по подтоплению, когда было зафиксировано, что все очаги тления потушены, из шурфов были взяты повторные пробы торфа с глубин, соответствующих глубинам, тление в которых было остановлено именно в результате подъема уровня воды. Также после окончания работ и снижения уровня воды на потушенном участке в результате фильтрации и испарения была проведена контрольная съемка тепловизионной камерой с беспилотника.

Все результаты измерений заносили в рабочие карты и схемы.

В лабораторных условиях взятые пробы были высушены до нулевой влажности в соответствии с ГОСТ 5180–2015 [16]. Высушивание проводили при 90 °С со взвешиванием через 5 ч и затем через каждые 2 ч до прекращения изменения массы проб.

Результаты и обсуждение

В целях реализации первой задачи (на основании практического опыта тушения указанных пожаров и научных трудов различных исследователей идентифицировать недостатки и достоинства методов тушения) следует обратить внимание, что на территории Российской Федерации применяют два метода борьбы с почвенными пожарами – косвенное (непрямое) тушение и прямое тушение водой [17], каждый из которых имеет свои недостатки.

Для создания канав вокруг очагов тления огня на глубину, достигающую минерального грунта, требуется дорогостоящая техника. При этом объемы землеройных работ, как правило, значительные, а надежность локализации пожара низкая, так как искры с тепловыми воздушными потоками перелетают через препятствия и создают новые очаги тления. Такие перебросы искр происходят особенно часто, если отвал грунта был сформирован на стороне пожара, а не на противоположной (защищаемой) стороне канала. Локализация торфяного пожара каналом до минерального грунта или до уровня грунтовых вод требует огромных затрат: силы и средства пожаротушения необходимо содержать в готовности до наступления осенней дождливой погоды [18].

Тушение компактными струями воды дает отличный результат в ходе ликвидации единичных очагов тления. Однако данный метод целесообразен только при наличии вблизи пригодных для тушения водных источников и обеспечении очень тщательного контроля качества работы щупами-термометрами. Расход воды при таком методе составляет от 300 л на каждый 1 м²

горящей поверхности при тушении очагов глубиной до 30 см и почти 1 000 л на 1 м² при тушении очагов глубиной 50–100 см. Расход воды при тушении более глубоких очагов (1,5–2,0 м и более) может быть значительно выше.

Тушение при помощи стволов ТС-1 и ТС-2 действующих пожаров на практике оказалось неэффективным из-за недостаточного объема подаваемой жидкости и большой трудоемкости работ [9].

Еще один способ тушения торфяных пожаров, предложенный В.А. Сретенским [19], заключается в последовательном перемешивании слоев тлеющего торфа с нетлеющим влажным. Это, по утверждению автора, обеспечивает резкое снижение температуры, поскольку температура горящего торфа находится в пределах 400–600 °С, а не горящего даже в жаркую погоду не превышает 100 °С. При неоднократном перемешивании температура снижается настолько, что тление прекращается. Эффективность этого способа доказана на мелкозалежных торфяниках, когда слой горящего торфа перемешивают с подстилающими минеральными породами, а также в случаях, когда тление затрагивает только поверхностные слои. Метод нерезультативен при тушении очагов глубиной более 1,5 м.

Схожий метод тушения очагов тления предложил и опробовал на пожарах в Свердловской обл. в зимний период 2022/23 г. И.М. Секерин с соавт. [20]. Опыт послойного снятия горящего торфа бульдозером и рассеивания тлеющего торфа по поверхности охлажденного зимними морозами грунта дал очень хороший практический результат – надежное тушение очагов горения (тления) огня обеспечивалось относительно небольшими затратами (тушение до 3 га в рабочую смену осуществлялось двумя бульдозерами), кроме того, зимой лесопожарную технику не использовали на других лесных пожарах и иных объектах, т. е. не создавалось дефицита ресурсов.

Тушение методами подтопления отдельных очагов и групп очагов (методами экстренного обводнения) приведено в Рекомендациях по тушению торфяных пожаров на осушенных болотах [18], а также в работе И.М. Секерина с соавт.

[21], а с 2023 г. вошло в перечень мер, закрепленных в Правилах тушения лесных пожаров [22], утвержденных приказом Министерства природных ресурсов и экологии Российской Федерации от 01.04.2022 № 244 «Об утверждении Правил тушения лесных пожаров» (зарегистрирован 12.08.2022 № 69620).

Принцип тушения подтоплением основан на том, что подъем уровня грунтовой воды обеспечивает влажность торфа и теплообмен за счет прибывающей воды: очаги тления не могут развиваться в глубину из-за того, что выделяемой при тлении энергии не хватает для испарения необходимых объемов воды. При повышении влажности в толще торфа, окружающей очаги, тление не может развиваться и горизонтально. При подъеме уровня воды выше поверхности почвы с образованием зеркала открытой воды на поверхности очаги не только охлаждаются, но и изолируются от поступающего атмосферного воздуха.

Для получения необходимых данных с целью разработки и совершенствования научно обоснованных методик тушения торфяных пожаров подтоплением, потенциально позволяющих существенно снизить временные и материальные затраты на ликвидацию очагов горения (тления) по сравнению с другими способами косвенного и прямого тушения, были проведены измерения влажности торфа на действующем типичном торфяном пожаре. В табл. 1 представлена характеристика шурфов, приведены экспериментальные данные о влажности торфа на различных глубинах до и после тушения подтоплением.

Показатели уровня грунтовых вод до подтопления и после подавления очагов приведены в табл. 2.

Кроме данных о влажности торфа, влияющей на возможность развития торфяных очагов, в результате исследования были получены значения времени фильтрации воды на горящем торфянике, осушенном с целью фрезерной добычи торфа, а также даны оценки объемов воды, которые потребовались для подъема уровня грунтовой воды и подтопления (тушения) очагов для участка с известными параметрами.

ТАБЛИЦА 1. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ОБЪЕКТОВ ИССЛЕДОВАНИЯ

№ ШУРФА И КООРДИНАТЫ	№ ПРОБЫ	ГЛУБИНА ЗАБОРА ПРОБ ТОРФА, СМ	МАССА ПРОБЫ ТОРФА, Г	ХАРАКТЕРИСТИКА ТОРФА В ПРОБЕ	МАССА ПРОБЫ ТОРФА ПОСЛЕ ВЫСУШИВАНИЯ ДО 0 %, Г	ОТНОШЕНИЕ МАССЫ ВОДЫ К МАССЕ СУХОГО ГРУНТА, %
Зона активного тления вблизи поверхности земли, температура около 300 °С						
Шурф 1. N 59.746999 E 31.535813	1	15	96,0	Верховой, преимущественно сфагновый, средней степени разложения	43,0	123,2
Шурф 2. N 59.747069 E 31.536328	4	10	100,0	То же	31,0	222,5
Шурф 3. N 59.746964 E 31.535244	10	10	100,0	- « -	36,0	177,7
Зона пиролиза в нижней части очага, температура от 40 до 90 °С						
Шурф 1. N 59.746999 E 31.535813	2	35	100,0	Верховой, преимущественно сфагновый, средней степени разложения	31,0	222,5
Шурф 2. N 59.747069 E 31.536328	5	30	100,0	То же	22,0	354,5
Шурф 3. N 59.746964 E 31.535244	11	45	100,0	- « -	20,0	400,0
Зона ниже дна очага, температура ниже 40 °С, очаг не развивается на эту глубину						
Шурф 1. N 59.746999 E 31.535813	3	40	100,0	Переходный, средней и низкой степени разложения	27,0	270,3
Шурф 2. N 59.747069 E 31.536328	6	40	100,0	То же	21,0	376,1
Шурф 3. N 59.746964 E 31.535244	12	60	100,0	- « -	19,0	426,3
Зона ниже дна очага, чуть выше уровня грунтовой воды (УГВ)						
Шурф 2. N 59.747069 E 31.536328	7	105	100,0	Низинный, осоково-тростниковый, низкой степени разложения	12,0	733,3
Бывшая зона активного горения после тушения подтоплением и установления нового УГВ						
Шурф 1. N 59.746999 E 31.535813	8	10	100,0	Верховой, преимущественно сфагновый, средней степени разложения	16,0	525,0
Шурф 3. N 59.746964, E 31.535244	13	25	100,0	То же	32,0	212,5
Бывшая зона пиролиза после тушения подтоплением						
Шурф 1. N 59.746999 E 31.535813	9	20	100,0	Верховой, преимущественно сфагновый, средней степени разложения	23,0	334,7

Таблица 2. Уровень грунтовых вод (УГВ) до подтопления и после подавления очагов

УГВ до подтопления		УГВ после подавления очагов	
Вариант опыта	УГВ исходный под шурфом / расстояние от УГВ до нижней границы очага, см	Вариант опыта	Результат подтопления, см
УГВ 1	105 / 65	УГВ 1.1	15, с последующим понижением в течение суток до 55 / очаги ликвидированы
УГВ 2	105 / 65	УГВ 2.1	0, устойчивое подтопление поверхности почвы / очаги ликвидированы
УГВ 3	125 / 65	УГВ 3.1	10, с последующим понижением в течение суток до 30 / очаги ликвидированы

На изучаемом освоенном торфяном болоте с осушением под фрезерную разработку верховой залежи влажность торфа, при которой вертикальное (вглубь) развитие пожара не происходило (энергии тления не хватает для испарения достаточного количества воды, чтобы инициировать подсушку и воспламенение), составила около 300–400 % массы сухого вещества. Подъем грунтовой воды до расчетных отметок (50 см от поверхности почвы и выше) останавливает вертикальное развитие очагов тления торфа, а увеличение влажности до критической отметки в 400 % в примыкающей к очагам массе торфа, предположительно, останавливает и горизонтальное развитие очага тления. Остановка горизонтального развития тления при меньших значениях влажности в пробах из шурфа 3 может быть связана с другими воздействиями, которые проводились при тушении (валка опасных деревьев с выкорчевыванием корней, работа лопатами на краю очагов) и могли улучшить теплообмен.

Выводы

На основании результатов исследования на торфяном пожаре в окрестностях оз. Люкосаргское, а также с учетом аналогичных наблюдений в различные периоды времени за схожими торфяными пожарами на бывших фрезерных разработках можно утверждать, что уровень грунтовой воды, при которой действующие очаги тления не могут развиваться вертикально (заглубляться), варьирует от 50 до 70 см для исследованных

случаев и это может быть общей закономерностью для фрезерных торфопроизводств на верховых залежах.

По предварительной оценке, соотношение объемов воды, которые потребовались на модельных участках для достижения необходимого подъема уровня грунтовой воды и повышения влажности, а также объема заполняемой водой сети картовых и валовых каналов на подтапливаемой территории составляет 4:1. Иными словами, на каждый 1 м³ пустых каналов на подтапливаемой территории для подъема УГВ потребовалось закачать не менее 4 м³ воды. Замер времени, которое требовалось для выравнивания уровня воды в заполняемых картовых каналах и в водомерных скважинах, расположенных вблизи очагов тления в центральной части торфяных карт, показал, что средняя скорость горизонтальной фильтрации воды в данных условиях составила 0,2–0,3 м/мин.

В ходе исследования выявлено, что во всех наблюдаемых очагах происходит усиление поверхностного тления и переход его в открытое пламенное горение перед окончательным затуханием очагов при подъеме уровня грунтовых вод. Можно предположить, что такое явление вызвано воздействием пара, который образуется при контакте воды с нижерасположенными зонами тления (вероятно, пар, поднимаясь вверх, способствует улучшению вентиляции воздухом верхних слоев тлеющих материалов).

В целях обеспечения достоверности соответствия приведенного описания для других типов торфа и других способов добычи требуется

продолжить исследование. Результаты предыдущих исследований свойств торфа как топлива [5, 7] допускают возможность, что критическое значение влажности, сдерживающее горизонтальное и вертикальное развитие очагов, может отличаться для торфа с разными характеристиками, влияние на развитие очагов может оказывать зольность, плотность и степень разложения торфа. Одновременно следует отметить недостаточную изученность влияния очага тления на примыкающие слои торфа, особенно при горизонтальном развитии. Отсутствуют данные о том:

- ✓ насколько далеко распространяется влияние тепла очага на испарение влаги (подсушка);
- ✓ насколько значительно преобразование части органических материалов при происходящем в этих слоях пиролизе;
- ✓ как влияют на горение выделяемые газообразные продукты пиролиза и начинающегося горения;

- ✓ как происходит теплообмен между горящими и негорящими областями при различных уровнях влажности и для различных видов торфа.

В ходе дальнейшего исследования необходимо:

- ✓ определить точные границы уровня грунтовой воды и влажности, до которых следует увлажнять торф в целях прекращения тления (для его различных видов, а также разных видов нарушенных болот);
- ✓ дать более точную оценку объемов воды, необходимых для достижения требуемого эффекта;
- ✓ измерить такие характеристики, как скорость фильтрации в различных видах деградированных торфов, испарение с зеркала воды в наполняемых водой каналах, испарение с листы поврежденной пожаром растительности, для оценки влияния на водный баланс болота на пожаре.

Автор благодарит за совместную работу на пожаре и помощь в организации полевых экспериментов руководство и личный состав ГУ МЧС по Ленинградской области, руководство и личный состав пожарной охраны Кировского района, а также Общество добровольных лесных пожарных. Особенную благодарность автор выражает Наталье Максимовой за организацию и проведение полетов беспилотного воздушного судна, Владимиру Рыкову за оформление разрешений на использование воздушного пространства и за постобработку материалов тепловой съемки, Дмитрию Семенову и Василию Аксенову за измерения GNSS (RTK)-приемником и обработку данных, Людмиле Крючковой за организацию экспедиции, а также всему коллективу отдела лесной пирологии ФБУ ВНИИЛМ и Вере Александровне Савченковой за научные консультации и поддержку.

Список источников

1. Швиденко, А.З. Климатические изменения и лесные пожары в России / А.З. Швиденко, Д.Г. Щепаченко // Лесоведение. – 2013. – № 5. – С. 50–61.
2. Goldammer, J.G. Potential Impacts of Climate Change on Fire Regimes in the Tropics Based on Magicc and a GISS GCM-Derived Lightning Model. – Текст : электронный / J.G. Goldammer, C. Price // Climatic Change. – 1998. – Vol. 39. – P. 273–296. – Режим доступа: <https://doi.org/10.1023/A:1005371923658>.
3. Арцыбашев, Е.С. Лесные пожары и борьба с ними : монография / Е.С. Арцыбашев. – Москва : Лесная промышленность, 1974. – 148 с.
4. Горфин, О.С. Технология переработки торфа : учебное пособие для вузов / О.С. Горфин, В.С. Зайцев. – Москва : Недра, 1983. – 143 с.
5. Наумович, В.М. Искусственная сушка торфа : учебное пособие для вузов / В.М. Наумович. – Москва : Недра, 1984. – 222 с.
6. Golovanov, A.I. Recultivation of disturbed lands / A.I. Golovanov, F.M. Zimin, V.I. Smetanin // DEER publisher. Moscow. – 2015. – С. 336.
7. Flinn, M.A. Depth of underground plant organs and theoretical survival during fire / M.A. Flinn, R.W. Wein // Canadian Journal of Botany. – 55(19). – 2550–2554. doi:10.1139/b77-291.
8. Frandsen, W.H. Ignition probability of organic soils / W.H. Frandsen // Canadian Journal of Forest Research. – 1997. – Vol. 27. – № 9. – P. 1471–1477. DOI: 10.1139/x97-106 17.
9. Smoldering combustion limits in peat as influenced by moisture, mineral content, and organic bulk density/ editors: D.C. MacIver, H. Auld, R. Whitewood // Proceedings of the 10th Conference on Fire and Forest Meteorology (April 17–21, 1989, Ottawa, Ontario). – Northern Forestry Centre, 1989. – 471 p.
10. Zhuravleva, L. Justification of technological solutions for irrigation with electrified circular sprinkler machines. – Текст : электронный / Larisa Zhuravleva and Kristina Semenova // VIII International Conference on Advanced Agritechnologies, Environmental Engineering and Sustainable Development (AGRITECH-VIII 2023). – Krasnoyarsk, Russia, March 29–31, 2023. – Vol. 390. – Режим доступа: DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202339001014>.
11. Глушков, И.В. Влияние гидрологических условий на формирование лесных торфяников и мелкоторфяных лесов на водоразделах Центрально-лесного заповедника / И.В. Глушков, А.А. Сирин, Т.Ю. Минаева // Современные проблемы экологии. – 2017. – Т. 10. – С. 770–783.
12. Мисников, О.С. Туманное будущее торфяной отрасли России / О.С. Мисников, В.В. Панов // Техника и технология горного дела. – 2018. – 1(1). – С. 43–56.
13. Peat-water interrelationships in a tropical peatland ecosystem in Southeast Asia. – Текст : электронный / J.H.M. Wösten, E. Clymans, S.E. Page, J.O. Rieley, S.H. Limin // Catena. – 73 (2). – 2008. – 212–224. – Режим доступа: doi:10.1016/j.catena.2007.07.010. 10.1016/j.catena.2007.07.010.
14. Чикирева, Т.В. Исследование водно-теплового режима торфяного грунта вокруг трубопровода при подземной прокладке : автореф. дисс. ... канд. техн. наук : 05.23.03 / Т.В. Чикирева. – Тюмень, 2005. – 22 с.
15. Оценка масштабов ландшафтных пожаров 2020 года на территории России / И.В. Глушков [и др.] // Вопросы лесной науки. – 2021. – Т. 4. – № 2.
16. ГОСТ 5180–2015. Межгосударственный стандарт. «Грунты. Методы лабораторного определения физических характеристик». – Москва : Стандартинформ, 2016. – 24 с.
17. Залесов, С.В. Лесная пирология. Термины, понятия, определения: учебный справочник / С.В. Залесов, Е.С. Залесова. – Екатеринбург : Урал. гос. лесотехн. ун-т, 2014. – 54 с.
18. Рекомендации по тушению торфяных пожаров на осушенных болотах / Д.И. Исаев, Н.А. Коршунов, М.Л. Крейндин, Г.В. Куksин, Ю.Б. Петренко, И.Г. Семенов, Ф. Эдом. – Москва : Сити Принт, 2019. – С. 10–109.
19. Сретенский, В.А. Тушение торфяных пожаров / В.А. Сретенский // Лесное хозяйство. – 1980. – № 7. – С. 54–56.

20. Специфика распространения и тушения торфяных пожаров в зимний период / И.М. Секерин, Г.А. Годовалов, А.М. Ерицов, С.В. Залесов // *Лесной вестник*. – 2022. – № 5. – С. 64–70.
21. Опыт тушения торфяных пожаров на Среднем Урале / И.М. Секерин, А.М. Ерицов, А.А. Кректунов, С.В. Залесов // *Международный научно-исследовательский журнал*. – Ч. 2. – 2022. – № 5 (119). – С. 81–85.
22. Об утверждении Правил тушения лесных пожаров. Приказ Министерства природных ресурсов и экологии Российской Федерации от 01.04.2022 № 244 (Зарегистрирован 12.08.2022 № 69620).

References

1. Shvidenko, A.Z. Klimaticheskie izmeneniya i lesnye pozhary v Rossii / A.Z. Shvidenko, D.G. Shchepashchenko // *Lesovedenie*. – 2013. – № 5. – С. 50–61.
2. Goldammer, J.G. Potential Impacts of Climate Change on Fire Regimes in the Tropics Based on Magicc and a GISS GCM-Derived Lightning Model. – Текст : электроннй / J.G. Goldammer, S. Price // *Climatic Change*. – 1998. – Vol. 39. – R. 273–296. – Режим доступа: <https://doi.org/10.1023/A:1005371923658>.
3. Arcybashev, E.S. Lesnye pozhary i bor'ba s nimi : monografiya / E.S. Arcybashev. – Moskva : Lesnaya promyshlennost', 1974. – 148 s.
4. Gorfin, O.S. Tekhnologiya pererabotki torfa : uchebnoe posobie dlya vuzov / O.S. Gorfin, V.S. Zajcev. – Moskva : Nedra, 1983. – 143 c.
5. Naumovich, V.M. Iskustvennaya sushka torfa : uchebnoe posobie dlya vuzov / V.M. Naumovich. – Moskva : Nedra, 1984. – 222 s.
6. Golovanov, A.I. Recultivation of disturbed lands / A.I. Golovanov, F.M. Zimin, V.I. Smetanin // DEER publisher. Moscow. – 2015. – С. 336.
7. Flinn, M.A. Depth of underground plant organs and theoretical survival during fire / M.A. Flinn, R.W. Wein // *Canadian Journal of Botany*. – 55(19). – 2550–2554. doi:10.1139/b77-291.
8. Frandsen, W.H. Ignition probability of organic soils / W.H. Frandsen // *Canadian Journal of Forest Research*. – 1997. – Vol. 27. – № 9. – R. 1471–1477. DOI: 10.1139/x97-106 17.
9. Smoldering combustion limits in peat as influenced by moisture, mineral content, and organic bulk density/ editors: D.C. MacIver, H. Auld, R. Whitewood // *Proceedings of the 10th Conference on Fire and Forest Meteorology* (April 17–21, 1989, Ottawa, Ontario). – Northern Forestry Centre, 1989. – 471 p.
10. Zhuravleva, L. Justification of technological solutions for irrigation with electrified circular sprinkler machines. – Текст : электроннй / Larisa Zhuravleva and Kristina Semenova // VIII International Conference on Advanced Agritechnologies, Environmental Engineering and Sustainable Development (AGRITECH-VIII 2023). – Krasnoyarsk, Russia, March 29–31, 2023. – Vol. 390. – Режим доступа: DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202339001014>.
11. Glushkov, I.V. Vliyanie gidrologicheskikh uslovij na formirovanie lesnyh torfyanikov i melkotorfnykh lesov na vodorazdelah Central'no-lesnogo zapovednika / I.V. Glushkov, A.A. Sirin, T.Yu. Minaeva // *Sovremennyye problemy ekologii*. – 2017. – Т. 10. – С. 770–783.
12. Misnikov, O.S. Tumannoe budushchee torfyanoy otrasli Rossii / O.S. Misnikov, V.V. Panov // *Tekhnika i tekhnologiya gornogo dela*. – 2018. – 1(1). – С. 43–56.
13. Peat-water interrelationships in a tropical peatland ecosystem in Southeast Asia. – Текст : электроннй / J.H.M. Wösten, E. Clymans, S.E. Page, J.O. Rieley, S.H. Limin // *Catena*. – 73 (2). – 2008. – 212–224. – Режим доступа: doi:10.1016/j.catena.2007.07.010. 10.1016/j.catena.2007.07.010.
14. Chikireva, T.V. Issledovanie vodno-teplovogo rezhima torfyanogo grunta vokrug truboprovoda pri podzemnoy prokladke : avtoref. diss. ... kand. tekhn. nauk : 05.23.03 / T.V. Chikireva. – Tyumen', 2005. – 22 s.

15. Ocenka masshtabov landshaftnyh pozharov 2020 goda na territorii Rossii / I.V. Glushkov [i dr.] // Voprosy lesnoj nauki. – 2021. – T. 4. – № 2.
16. GOST 5180–2015. Mezhgosudarstvennyj standart. «Grunty. Metody laboratornogo opredeleniya fizicheskikh harakteristik». – Moskva : Standartinform, 2016. – 24 s.
17. Zalesov, S.V. Lesnaya pirologiya. Terminy, ponyatiya, opredeleniya: uchebnyj spravochnik / S.V. Zalesov, E.S. Zalesova. – Ekaterinburg : Ural. gos. lesotekhn. un-t, 2014. – 54 s.
18. Rekomendacii po tusheniyu torfyanyh pozharov na osushennyh bolotah / D.I. Isaev, N.A. Korshunov, M.L. Krejndlin, G.V. Kuksin, Yu.B. Petrenko, I.G. Semenov, F. Edom. – Moskva : Siti Print, 2019. – S. 10–109.
19. Sretenskij, V.A. Tushenie torfyanyh pozharov / V.A. Sretenskij // Lesnoe hozyajstvo. – 1980. – № 7. – S. 54–56.
20. Specifika rasprostraneniya i tusheniya torfyanyh pozharov v zimnij period / I.M. Sekerin, G.A. Godovalov, A.M. Ericov, S.V. Zalesov // Lesnoj vestnik. – 2022. – № 5. – S. 64–70.
21. Opyt tusheniya torfyanyh pozharov na Srednem Urale / I.M. Sekerin, A.M. Ericov, A.A. Krektunov, S.V. Zalesov // Mezhdunarodnyj nauchno-issledovatel'skij zhurnal. – Ch. 2. – 2022. – № 5 (119). – C. 81–85.
22. Ob utverzhdenii Pravil tusheniya lesnyh pozharov. Prikaz Ministerstva prirodnyh resursov i ekologii Rossijskoj Federacii ot 01.04.2022 № 244 (Zaregistrovan 12.08.2022 № 69620).