

УДК 631.4

DOI: 10.19047/0136-1694-2025-125-78-110



Ссылки для цитирования:

Анциферова О.А. Пирогенная деградация и потери углерода на выработанном осушенном верховом торфянике // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2025. Вып. 125. С. 78-110. DOI: 10.19047/0136-1694-2025-125-78-110

Cite this article as:

Antsiferova O.A., Pyrogenic degradation and carbon loss in cut-over drained peatland, Dokuchaev Soil Bulletin, 2025, V. 125, pp. 78-110, DOI: 10.19047/0136-1694-2025-125-78-110

Благодарность:

Работа выполнена в рамках государственного задания БФУ им. И. Канта по теме НИР “Климатический мониторинг природных и антропогенных систем Калининградской области в условиях глобальных изменений окружающей среды” (FZWM-2024-0015) в части реализации проекта Министерства науки и высшего образования РФ по созданию карбоновых полигонов.

Acknowledgments:

The work was carried out within the framework of the state assignment of the Immanuel Kant Baltic Federal University on the research topic “Climate monitoring of natural and anthropogenic systems of the Kaliningrad region in the context of global environmental change” (FZWM-2024-0015), and in particular as implementation of the project of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation on the creation of carbon polygons.

Пирогенная деградация и потери углерода на выработанном осушенном верховом торфянике

© 2025 г. О. А. Анциферова

*Балтийский Федеральный университет им. И. Канта,
236041, Калининград, ул. Александра Невского, 14.*

*ФГБОУ ВО “Калининградский государственный технический
университет”,
236022, Калининград, Советский проспект, 1.*

**<https://orcid.org/0000-0001-5389-7243>,
e-mail: olga.antsiferova@klgtu.ru.*

Поступила в редакцию 03.07.2025, принята к публикации 16.09.2025

Резюме: Современные климатические изменения обостряют проблему торфяных пожаров и требуют выработки единого методического подхода для оценки потерь углерода. Исследование проведено в 2024–2025 гг. на территории выработанного торфяного месторождения верхового типа, подвергшегося пожарам в 2011 г. и расположенного в пределах Калининградской области (Юго-Восточная Прибалтика). Методология сочетает традиционные подходы почвоведения (профильный метод) с геоботаническими приемами выявления индикаторной роли древесной растительности при определении глубины прогорания и осадки постпирогенной поверхности. В качестве основы прикладной оценки пирогенно-измененных почв использована классификация интенсивности почвенных пожаров по глубине выгорания торфяного слоя, принятая в области лесной пирологии. На примере двух тестовых участков, отличающихся строением остаточной торфяной залежи, мощностью органогенного профиля и локальными особенностями осушения, изучены потери углерода в полосе кавальеров и на торфяных картах. Показано, что при слабых пожарах происходит пирогенная деградация преимущественно верхних слоев торфяных почв, что сопровождается потерями от 5.31 до 20.2 кг С/м². При пожарах средней интенсивности пирогенная деградация захватывает как верхние, так и глубокие слои торфяного профиля с образованием подземных полостей выгорания, а также горизонтов термически измененного торфа. Потери углерода возрастают до 24.5–36.7 кг С/м². В очагах сильных пожаров весь торфяной профиль, исходно представлявший залежь смешанного типа, подвергается пирогенной деградации с необратимой потерей большей части горизонтов и общей убылью углерода 50.36–65.40 кг С/м². Участки сильных пожаров приурочены к почвам кавальеров. В пространственном аспекте потери углерода складываются из долевого участия очагов пожаров разной силы в общей мозаичной картине постпирогенной поверхности. Густая сеть открытых мелких каналов способствует быстрому распространению пожара внутрь торфяника по кавальерам, что в итоге приводит к высоким площадным потерям углерода за счет более глубокой пирогенной деградации почв на торфяных картах.

Ключевые слова: болотные почвы; торфяные пожары; глубина прогорания; пирогенные потери углерода.

Pyrogenic degradation and carbon loss in cut-over drained peatland

© 2025 O. A. Antsiferova

*Immanuel Kant Baltic Federal University,
14 A. Nevskogo St., Kaliningrad 236041, Russian Federation.*

*Kaliningrad State Technical University,
1 Sovetsky Prospekt, Kaliningrad 236022, Russian Federation.*

**<https://orcid.org/0000-0001-5389-7243>,*

e-mail: olga.antsiferova@klgtu.ru.

Received 03.05.2025, Accepted 16.09.2024

Abstract: Modern climate change exacerbates the problem of peat fires and requires a unified methodological approach for assessing carbon losses. The study was conducted in 2024–2025 on the territory of a developed high-moor peat deposit that was affected by fires in 2011 and is located within the Kaliningrad region (South-Eastern Baltic region). The methodology combines traditional approaches of soil science (profile method) with geobotanical techniques of revealing the indicator role of woody vegetation in determining the depth of burning and precipitation of the post-pyrogenic surface. As a basis for the applied assessment of pyrogenically altered soils, the classification of the intensity of soil fires by the depth of burning of the peat layer, adopted in the field of forest pyrology, is used. Using the example of two test sites with different residual peat deposits, organic profile thickness, and local drainage features, we studied carbon losses in the cavalier strip and on peat maps. It was shown that weak fires cause pyrogenic degradation of the upper layers of peat soils, resulting in losses ranging from 5.31 to 20.2 kg C/m². In medium-intensity fires, pyrogenic degradation affects both the upper and lower layers of the peat profile, resulting in the formation of underground combustion cavities and thermally altered peat horizons. Carbon losses increase to 24.5–36.7 kg C/m². In the areas of strong fires, the entire peat profile, which was originally a mixed-type deposit, undergoes pyrogenic degradation with an irreversible loss of most of the horizons and a total carbon loss of 50.36–65.40 kg C/m². The areas of strong fires are confined to the soils of the cavalier. In the spatial aspect, carbon losses are composed of the share of fire foci of different strength in the overall mosaic pattern of the post-pyrogenic surface. A dense network of open shallow channels contributes to the rapid spread of fire into the peatland along the cavalier, which ultimately leads to high area-based carbon losses due to deeper pyrogenic degradation of soils on peat maps.

Keywords: bog soils; peat fires; depth of burning; pyrogenic carbon losses.

ВВЕДЕНИЕ

Пирогенное воздействие на торфяные почвы является самым опасным и разрушительным фактором их деградации, приводящим к потере органического углерода и выбросам парниковых газов (Rein, Huang, 2021; Che Azmi et al., 2021; Sirin et al., 2021). Актуальность проблемы также состоит в том, что торфяные пожары вносят существенный вклад в глобальную антропогенную эмиссию углерода до 15% (Poulter et al., 2006). Ряд авторов отмечает увеличение частоты пожаров на торфяниках в связи с климатическими изменениями на фоне изменения структуры землепользования (Schmidt, 2024; Wilkinson et al., 2023). Проблема изучения последствий пирогенной деградации особенно актуальна для России, где торфяные почвы занимают огромные площади – по разным данным от 143.5 до 193.4 млн га (Конюшков и др., 2022).

Наиболее подвержены пожарам осушенные и особенно выработанные торфяные месторождения (Зайдельман, Шваров, 2002; Зайдельман, Романов, 2007; Торф..., 2013; Медведева и др., 2023), на которых остаточный торфяной слой подвержен длительному и глубокому горению по типу тления (Turetsky et al., 2015; Рекомендации по тушению..., 2020; Мокряк, Парийская, 2021).

Результатом торфяных пожаров является пирогенная деградация болотных почв, которая выражается в трансформации органического углерода в жидкие, газообразные продукты горения и аэрозоли (дым, сажа, CO, CO₂, H₂), возникновении пирогенных образований, изменении спектральной отражательной способности поверхности. Помимо этого, формируется постпирогенный микро- и мезорельеф (бугристо-котловинный с подземными полостями), изменяется гидротермический режим болотных экосистем, их видовое разнообразие.

Недостаточная изученность проблемы оценки последствий пирогенного воздействия на торфяные почвы в бореальном поясе ограничивает возможности составления точных прогнозов постпирогенного снижения запасов органического вещества в целом и углерода в частности. В связи с этим отмечается возрастающий интерес к разработке методологии оценки потерь органического углерода и эмиссии газов при пожарах на торфяниках (Глу-

хова, Сирин, 2018; Сирин и др., 2019; Ефремова и др., 2021). При этом выделяется группа методов натуральных определений путем сопоставления зольности сгоревшего и несгоревшего торфа (Turetsky, Weider, 2001; Ефремова и др., 2021) и по положению корневой шейки (Davies et al., 2013; Сирин и др., 2019). Также апробируется группа дистанционных методов путем сопоставления разновременных съемок (Reddy et al., 2015; Сирин, 2018). Однако до настоящего времени не выработана единая методическая база для оценки потерь углерода от торфяных пожаров. В то же время в области лесной пирологии и методических основ тушения осушенных торфяников (Рекомендации по тушению, 2020; Залесов, 2021; Способы тушения, 2024) для оценки интенсивности торфяных пожаров используют шкалу из классификации Н.П. Курбатского (Курбатский, 1962). Эта группировка основана на глубине прогорания торфа: при пожарах слабой интенсивности – менее 25 см, при средней – 25–50 см, при сильной – свыше 50 см. По нашему мнению, данная шкала вполне может быть приложена к оценке степени пирогенной деградации торфяных почв при пожарах разной интенсивности и расчетам потерь углерода. Таким образом, реализуется междисциплинарный подход для решения прикладной задачи.

Актуальность проблемы торфяных пожаров на региональном уровне заключается в широком распространении болотных почв и интенсивном их использовании (промышленном и сельскохозяйственном). К середине XX в. болота занимали 6% территории Калининградской области (Калининградская область, 2011). При этом фонд промышленных месторождений торфа составляет 64.5 тыс. га (Географический атлас, 2002). На землях сельскохозяйственного назначения торфяные почвы занимают 4.4%. Большая часть крупных торфяных массивов расположена на польдерных землях Славского и Полесского округов вдоль побережья Куршского залива в пределах Неманской и Полесской низменностей. Помимо этого, в физико-географическом аспекте на территории области выделяются торфяные болота озерно-ледниковых, холмисто-моренных равнин, а также речных пойм (Природа Калининградской области, 2015, С. 59).

В XXI в. наиболее сильные и масштабные торфяные пожары

в Калининградской области отмечались в засушливом 2002 г., затем в 2006 г., когда ими было охвачено 4–7% площади торфяных полей (Исаева и др., 2010). Отмечается, что из всех пожаров на торфяниках за 2000–2010 гг. 74% приходилось на торфоразработки. Большой ущерб в 2002 г. был нанесен и осушаемым болотным низинным торфяным почвам на сельскохозяйственных угодьях (Анциферова, 2008, С. 98–129). Несмотря на острую актуальность проблемы торфяных пожаров в Калининградской области, данному вопросу посвящены лишь единичные вышеуказанные публикации. При этом в них напрямую не рассматриваются потери органического углерода. Поэтому в задачи исследования входило:

1. В границах типичного выработанного торфяного месторождения верхового типа изучить строение и запасы органического углерода в остаточных фоновых болотных почвах на участках с потенциальной высокой пожарной опасностью.

2. На примере двух тестовых участков установить глубину осадки поверхности и особенности строения постпирогенных почв в локальных очагах пожаров разной интенсивности (от слабых до сильных).

3. Определить послойные, профильные и площадные потери углерода в зависимости от особенностей пирогенного поражения.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Методология исследований заключается в сочетании профильного метода изучения болотных почв и их пирогенных вариантов с геоботаническими приемами оценки осадки поверхности для решения проблемы пирогенных потерь почвенного органического углерода в зависимости от класса интенсивности торфяного пожара. Степень пирогенной деградации болотных почв связывали с группировкой интенсивности торфяных пожаров по глубине прогорания, использующейся в лесной пирологии и методических указаниях по тушению торфяных пожаров (Рекомендации по тушению, 2020; Залесов, 2021; Способы тушения, 2024).

Исследования проведены в 2024–2025 гг. в пределах выработанного торфяного месторождения “Виттгирренский” площадью 112 га, расположенном в Славском муниципальном округе Калининградской области (рис. 1).

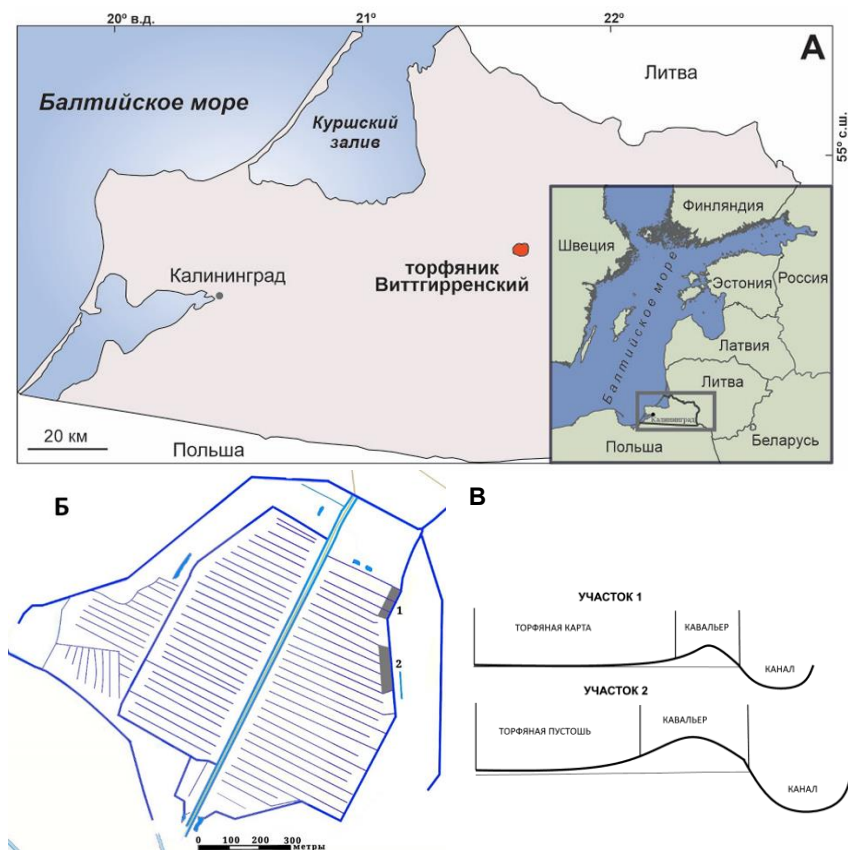


Рис. 1. Местоположение (А), схема открытых каналов осушительной сети (Б) торфяника Виттгирренского с контурами тестовых участков и поперечные профили участков с функциональными зонами (В).

Fig. 1. Location (A), scheme of open channels of the drainage network (Б) of the Wittgirren peat bog with contours of test sections and cross-sections of sections with functional zones (В).

Территория характеризуется гумидным бореальным климатом Юго-Восточной Прибалтики. По классификации термических режимов почвы относятся к умеренно теплому кратковременно

промерзающему фациальному подтипу (Классификация и диагностика..., 1977). По данным ближайшей к ключевому участку метеостанции (г. Черняховск), среднегодовое количество осадков – 752 мм (Географический атлас..., 2002). В ландшафтном плане территория располагается на волнистой моренной равнине, в глубоких понижениях которой в голоцене образовались торфяные болота. Подстилающими породами являются озерно-ледниковые и моренные тяжелые суглинки и глины. На торфянике верхового типа “Виттигиренский” (Торфяной фонд, 1952) в XX в. велась промышленная добыча торфа. После ее прекращения в начале 90-х годов XX в. остаточный слой верхового торфа в центральной части составляет 20–40 см, ближе к периферии торфяная залежь начинается с переходных торфов. Окраины заняты низинными торфами. Таким образом, современное почвообразование развивается на неоднородной в пространстве остаточной торфяной залежи.

Осушительная система торфовой разработки состоит из регулярной сети мелких картовых каналов, проложенных через 25–40 м, и отводящих воду в крупные каналы на периферии торфяника (рис. 1Б). Закрытый дренаж представлен гофрированными пластиковыми трубками диаметром 10 см. Работа осушительной системы нарушена вследствие механических повреждений. Однако проведенные исследования подтверждают наличие дренажного стока из части водовыпусков (Napreenko et al., 2024). Функционирование осушителей ускоряет потерю влаги из остаточной торфяной залежи. В первую очередь происходит иссушение почв на кавальерах, где в зависимости от погодных условий, начиная с конца мая-июня, складывается пожароопасная ситуация. Первоочередная подверженность кавальеров торфяным пожарам на осушенных болотах отмечается в ряде работ (Сирин и др., 2018; Рекомендации по тушению..., 2020).

В 2021 г. на выработанном торфянике “Виттигиренский” организован карбоновый полигон “Росянка” и начато изучение эмиссии парниковых газов (Карбоновые полигоны, 2025, С. 186–196). При почвенном картографировании выявлен пирогенный ареал в северо-восточной части торфяника (Antsiferova et al.,

2023). В 2011 г. территория подверглась локальным почвенным (торфяным) многоочаговым пожарам разной интенсивности (от слабой до сильной степени сложности). Спустя 14 лет функционирование пирогенно-измененных почв отличается от фоновых прежде всего по гидротермическому режиму. Результаты мониторинга климатически активных газов показывают пиковые значения эмиссии CO₂ именно с постпирогенных участков. Для изучения пирогенных потерь углерода в послепожарном ареале было выделено два тестовых участка (площадью 0.30 и 0.45 га) по принципу различия мощности и состава остаточной торфяной залежи. В пределах участков глубину прогорания и осадку поверхности оценивали отдельно в приканальной части (полоса разравнивания кавальеров) и на прилегающей территории торфяных карт (рис. 1В).

Строение почв устанавливалось в результате закладки разрезов и диагностического бурения с послойным отбором проб каждые 10 см до глубины 200 см. Отбор поверхностных слоев торфа проводили с шагом 1–5 см в зависимости от характера и глубины пирогенного повреждения. Фоновые профили почв описаны на участках, не подвергавшихся пожару в пределах торфовой выработки (Antsiferova et al., 2023). Диагностика исходных остаточных болотных почв проведена в соответствии с принципами классификации 1977 г. (Классификация и диагностика..., 1977) и WRB (World Reference Base, 2015). В описании пирогенных образований и пирогенно-измененных почв использованы рекомендации Ф.Р. Зайдельмана (Зайдельман, Шваров, 2002). На пирогенно-измененных почвах заложено по 20 скважин на каждом тестовом участке с послойным отбором проб до глубины минеральной подстилающей породы.

Локализация и площадь открытых участков выгорания определялись с помощью GPS-приемника Garmin Dacota, глубина выгорания – ручным промером линейкой длиной 2 м с разрешением 1 мм. Для выявления подземных полостей использовали металлическую трость с острым наконечником и зондировочный бур. Глубина осадки поверхности на участках подземного и комбинированного (открытого и подземного) горения определялась параллельно двумя методами: а) измерением положения корневой шей-

ки опаленных деревьев над поверхностью почвы с помощью металлической линейки-угольника и складной метровой рейки; б) измерением реликтовых пней сосны, которые в массе захоронены в торфянике при его природной эволюции из переходного в верховой; в результате пожара и гидротермической деградации пни частично выступили на поверхность (рис. 2). Все реликтовые в зоне пожара деревья несут признаки ожога. Первая методика изложена в научных работах и апробирована отечественными учеными (Davies et al., 2013; Сирин и др., 2019). Вторая является местной особенностью, которая повышает информативность первого метода.



Рис. 2. Измерение положения корневой шейки опаленных деревьев и высоты обнажившихся древних пней.

Fig. 2. Measurement of the position of the root collar of scorched trees and the height of exposed ancient stumps.

Лабораторные методы включали анализ зольности торфа путем его сжигания в муфельной печи при температуре 800 °С (ГОСТ 11306-2013), полевой и гигроскопической влажности – термостатно-весовым методом, плотности – методом режущих колец (Вадюнина, Корчагина, 1986), степени разложения торфа – макроскопическим методом по П.Д. Варлыгину (Зайдельман, 2009, С. 123–125). Количественное содержание углерода торфяных почв выполнено методом А. Анстета в модификации В.В. Пономаревой, Т.А. Николаевой (окисление сернохромовой смесью) (Пономарева, Плотникова, 1975), что позволяет избежать неточностей при использовании метода И.В. Тюрина. Потери углерода кг С/м² рассчитывались: 1) для слоев с полным сгоранием торфа – по запасам в аналогичных горизонтах фоновых почв, не подвергавшихся пожару; 2) при частичном сгорании – по разнице в зольности при сравнении с несгоревшими почвами и с учетом апробированных методик (Turetsky, Weider, 2001; Глухова, Сирин, 2018). Статистическая обработка, регрессионный анализ и графическая обработка данных проведены в программе Excel.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

На первом этапе исследования установили строение, полойные и общие запасы органического углерода в фоновых почвах, практически не подвергавшихся пирогенному воздействию. Профиль почв представляет собой систему последовательно сменяющихся слоев торфов различного типа (рис. 3). Таким образом, торфяная залежь имеет смешанный характер. После завершения промышленной стадии разработки месторождения наступил период восстановительных сукцессий, сопровождающийся активным действием биологического фактора почвообразования. Современные остаточные торфяные верховые почвы представлены двумя группами: переходные (Distric Hemic Histosols Drainic) на участке 1 и обычные на участке 2 (Fibric Histosols Drainic).

Различия в строении связаны с разной толщиной остаточной торфяной залежи и повышенной мощностью профиля на кавальерах по сравнению с торфяными картами. В составе верхового торфа преобладает пушицево-сфагновый и сфагновый фускум-торф. Последний и являлся объектом промышленной добычи (Торфяной

фонд, 1952). В стратиграфическом отношении эти слои залегают сверху, сменяясь сосново-пушицевым торфом. Горизонт переходных торфов составляют гипновые и древесно-осоковые виды. На кавальерах встречаются переслаивания верховых и переходных торфов. Низинные торфы представлены преимущественно древесными видами.

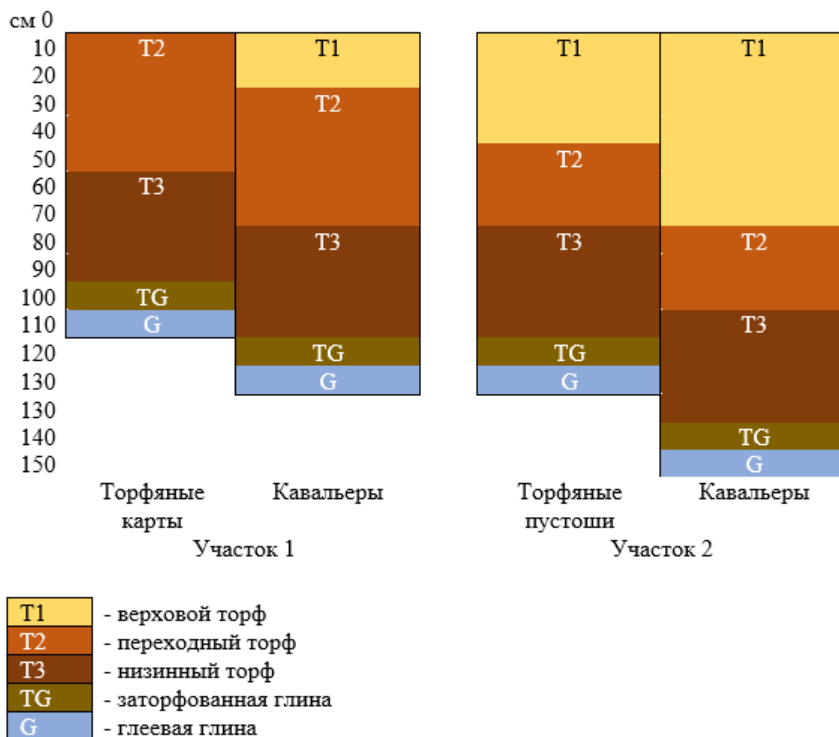


Рис. 3. Строение фоновых почв на торфовой разработке.
Fig. 3. Profiles of background soils in cut-over peatland.

Для верховых торфов характерны низкие значения зольности (рис. 4) – 1.53–2.02%, плотности – 0.08–0.11 г/см³ и степени разложения – 13–20%. По всей толще, особенно фускум-торфа, показатели очень слабо варьируют. Переходные виды торфа отли-

чаются также относительно невысокой зольностью (3.5–4.5%) и степенью разложения (25–45%). Верхняя часть низинных древесных торфов имеет зольность 5–11%, несмотря на сильную степень разложения (более 50%). И только в тонком (3–10 см) органо-минеральном слое (зоторфованная глина) зольность составляет свыше 30%.

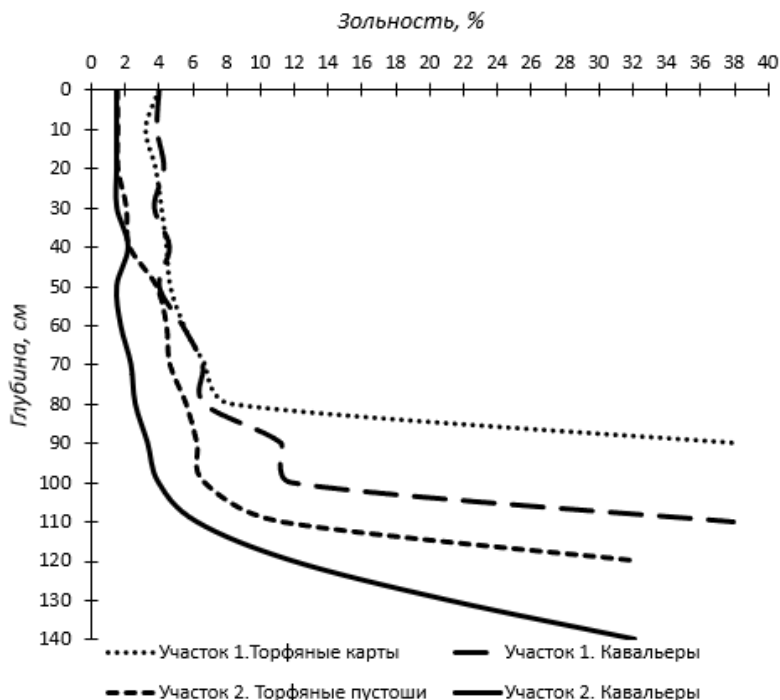


Рис. 4. Зольность фоновых почв на торфовой разработке.

Fig. 4. Ash content of background soils in cut-over peatland.

Содержание углерода в органическом веществе торфов варьировало от 50 и 53% в верховых и переходных типах до 54–55% в низинных. Запасы органического углерода в исходных почвах являются необходимым эталоном для оценки пирогенных потерь

этого элемента (табл. 1).

Таблица 1. Послойные и суммарные запасы органического углерода в фоновых почвах, не подвергавшихся пожару

Table 1. Layer-by-layer and total organic carbon reserves in background soils that were not affected by fire

Глубина, см	Болотные переходные почвы. Участок 1		Болотные верховые почвы. Участок 2	
	Торфяные карты	Кавальеры	Торф пустоши	Кавальеры
0–10	6.16 ± 0.11	6.11 ± 0.21	4.70 ± 0.02	4.70 ± 0.04
10–20	6.63 ± 0.11	6.11 ± 0.21	4.70 ± 0.01	4.70 ± 0.04
20–30	7.12 ± 0.09	6.09 ± 0.19	5.19 ± 0.01	5.22 ± 0.02
30–40	6.73 ± 0.08	6.12 ± 0.18	5.70 ± 0.01	5.18 ± 0.02
40–50	7.22 ± 0.03	6.57 ± 0.09	6.12 ± 0.02	5.22 ± 0.02
50–60	8.24 ± 0.04	6.61 ± 0.06	6.71 ± 0.03	5.21 ± 0.02
60–70	8.17 ± 0.08	7.29 ± 0.07	6.70 ± 0.03	6.21 ± 0.02
70–80	8.06 ± 0.08	7.71 ± 0.06	6.63 ± 0.04	6.19 ± 0.03
80–90	8.22 ± 0.09	7.70 ± 0.11	7.09 ± 0.04	6.78 ± 0.04
90–100	10.20 ± 0.21	9.95 ± 0.11	7.56 ± 0.06	7.26 ± 0.05
100–110	–	9.88 ± 0.13	9.97 ± 0.08	7.74 ± 0.05
110–120	–	9.91 ± 0.22	10.85 ± 0.12	7.90 ± 0.06
120–130	–	–	–	9.91 ± 0.06
130–140	–	–	–	11.03 ± 0.09
Суммарно	76.75 ± 0.18	84.04 ± 0.51	81.92 ± 0.16	93.25 ± 0.32

Индивидуальные послойные запасы возрастают по мере перехода от верховых к переходным и далее к низинным типам торфа в связи с увеличением плотности и обогащенности углеродом. Суммарные запасы находятся в прямой зависимости от мощности

торфяного профиля. Величины содержания и запасов углерода типичны для аналогичных болотных почв Европейской части России (Щепаченко и др., 2013; Чернова и др., 2016).

Пожар оказывает на торфяные почвы воздействие в трех вариантах: поверхностное пламенное горение, подземное беспламенное, совместно поверхностное и подземное. Наличие слабо-разложившегося торфа с древесными включениями увеличивает вероятность возникновения пламенного горения (Залесов, 2021, С. 82). Экспериментально установлено, что скорость ветра в 2.5 м/с является оптимальной для развития поверхностного пламенного горения торфа (Гришин, 2006). Однако наиболее длительным во времени и мало зависящим от погодных условий является процесс беспламенного горения (тления). В итоге возникает волнистый и бугристо-западинный постпирогенный рельеф с чередованием участков разной глубины выгорания торфяной залежи и скрытыми подземными пустотами.

Изменение морфологии болотных почв при пирогенной деградации связано с комплексным воздействием пожара на торфяной субстрат по трем направлениям:

1) полное сгорание с образованием золы – светло-серой в случае низкозольных торфов и охристой при выгорании низинных торфов (Зайдельман, 2002; Анциферова, 2008);

2) неполное сгорание – обугливание с образованием черной сыпучей массы повышенной гидрофобности на месте верхового и переходного торфов и черной зернисто-комковатой непластичной массы в случае низинного высокозольного торфа с исходно сильной степенью разложения;

3) термическое воздействие в зонах, прилегающих к очагам горения и тления, но не затронутого ими; выражается в увеличении интенсивности окраски исходного торфа, его степени разложения и зольности по причине ускоренной минерализации.

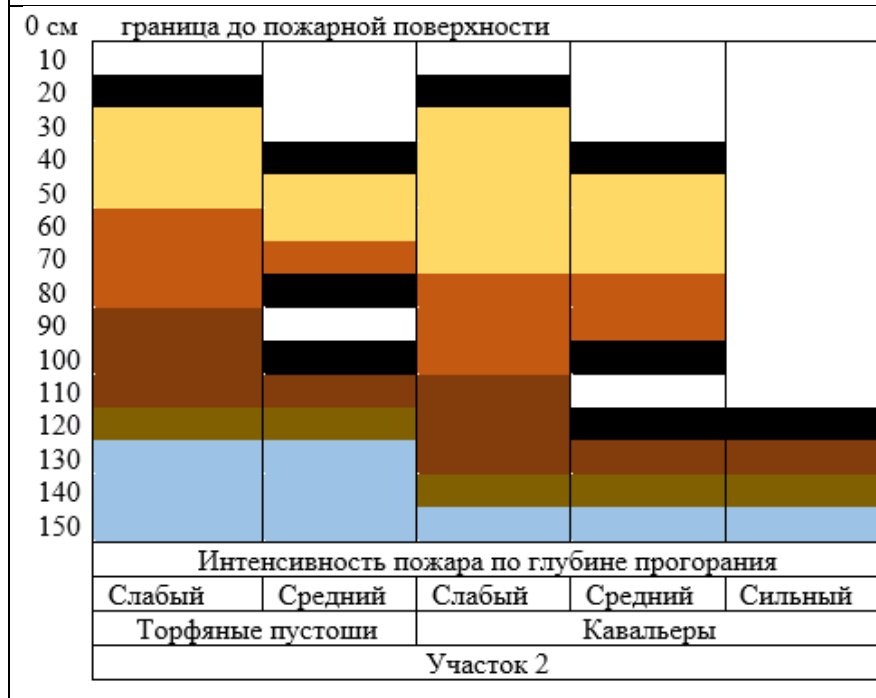
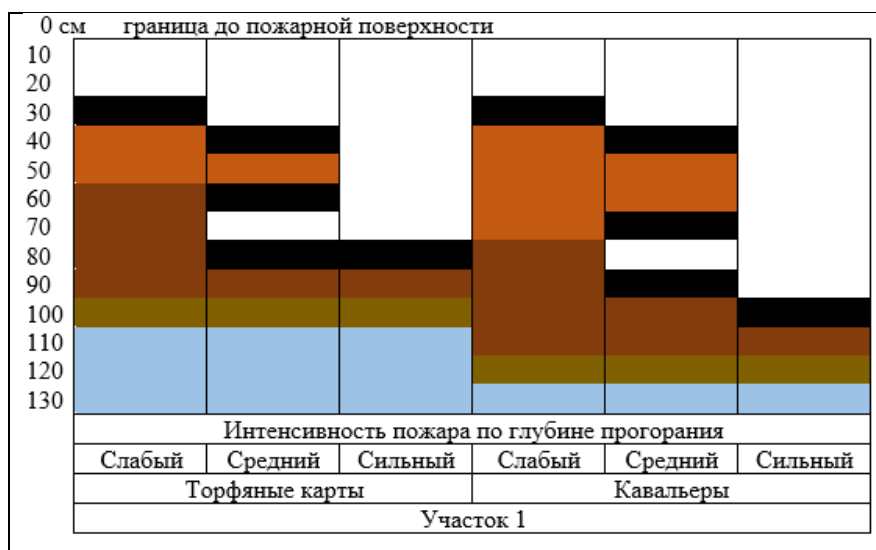
Все вышеуказанное приводит к образованию пространственной и вертикальной контрастности и микромозаичности постпирогенного почвенного покрова, что отмечается многими отечественными и зарубежными исследователями (Сирин, 2019; Ефремова, 2021; Hudspith et al., 2014) и сильно осложняет оценку потерь углерода. Для решения этой проблемы нами разработана и

апробирована методика, позволяющая учитывать локальные особенности и в тоже время вписывающаяся в группировку ландшафтных пожаров. Сущность методики заключается в рассмотрении постпирогенной поверхности как совокупности очагов пожара разной степени интенсивности. Задачей почвенного обследования при этом является установление строения и свойств почв в связи с разной степенью пожара и пирогенной деградации.

Все полевые выборки профилей диагностического бурения с послойным описанием морфологии и анализом свойств разделили по трем степеням интенсивности торфяного пожара и получили обобщенные варианты строения (рис. 5) с учетом данных по осадке поверхности, выполненной геоботаническими методами (табл. 2) и по промерам отрицательных форм микрорельефа пирогенного происхождения (ям, котловин). Морфология профилей соответствует нарастающей степени пирогенной деградации по мере воздействия пожара. В очагах слабых пожаров огнем повреждены лишь поверхностные слои почвы. При пожарах средней степени наблюдаются совместно поверхностное и подземное выгорание. Общая глубина выгорания складывается из осадки поверхности и подземных пустот (каверн). Очаги сильных пожаров диагностируются в понижениях с обрывистыми обугленными бортами. На дне понижений находятся маломощные торфянисто-пирогенные почвы, а при максимальном выгорании – пирогенные образования из углистого слоя, залегающего прямо на минеральной подстилающей породе.

По-видимому, пирогенное воздействие ускорило гидротермическую деградацию и сработку торфяных почв вследствие их термического высушивания и минерализации. Наличие подземных полостей спустя не менее чем 20 лет после пожара показывает, что процесс осадки и уплотнения еще не завершен.

Надо отметить, что метод определения осадки постпирогенной поверхности по положению корневой шейки применим только на лесопокрытых участках, причем с наличием допожарных деревьев “на корню”. Таким условиям соответствуют на участке 1 торфяные карты и частично кавальеры, а на участке 2 – только кавальеры со слабой степенью поражения пожаром.



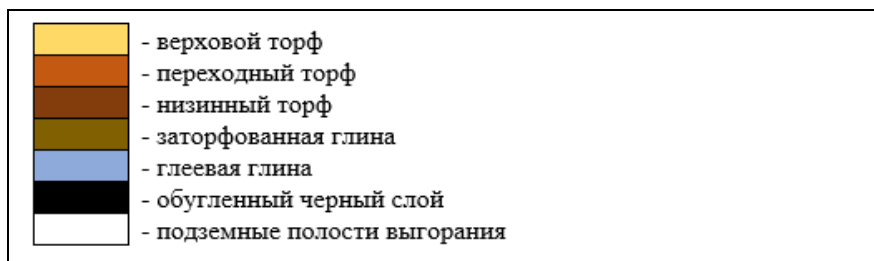


Рис. 5. Строение пирогенно-измененных почв при разной интенсивности торфяных пожаров.

Fig. 5. Structure of pyrogenically altered soils at different intensities of peat fires.

При глубине прогорания свыше 40 см происходит падение деревьев вследствие выгорания торфа, что лишает корни опоры. Поэтому локальные очаги сильных пожаров на тестовом участке 2 маркируются завалами деревьев, обращенных кроной в сторону источника горения в соответствии с классической схемой (Залесов, 2021, С. 82).

Расчет осадки по высоте реликтовых погребенных пней применим для участков их поверхностного размещения в очагах слабого пожара. В ямах выгорания нередко уровень пней ниже современной поверхности. В таких случаях применялся ручной промер глубин.

Как показывают результаты, оба метода дают очень близкие значения при совместном применении и замещают друг друга на участках голого торфа или с редкой послепожарной древесной порослью (на торфяных пустошах участка 2) и при отсутствии пней в слоях верхового торфа (на кавальерах участка 2) (табл. 2). В очагах пожаров средней силы информативность методов несколько снижается по причине асимметрии для разных сторон света по глубинам прогорания в прикорневой зоне, наличия мелких щелей и полостей между корнями, которые замаскированы дерниной. Особенно такие явления характерны для деревьев на кавальерах и вдоль бортов каналов. Тем не менее применение этих методов позволяет восстановить исходный уровень поверхности и внести корректировку в результаты ручных промеров мелких ям

выгорания.

Таблица 2. Осадка поверхности почвы в зонах слабого пожара по результатам промеров корневой шейки деревьев и погребенных пней
Table 2. Soil surface settlement in low-intensity fire zones based on measurements of tree root necks and buried stumps

Высота (см) над современной поверхностью почвы	Участок 1. Торфяные карты			Участок 2. Торфяные пустоши (по пням) и кавальеры (по корневой шейке)		
	n	M ± m	V	n	M ± m	V
Корневой шейки <i>Betula pubescens</i>	174	23.2 ± 0.8	57.2	51	12.3 ± 0.4	51.8
Погребенных пней <i>Pinus sylvestris</i>	82	20.4 ± 0.9	36.8	44	11.5 ± 0.2	25.4

Примечание. n – общая выборка, шт.; M ± m – среднее арифметическое ± ошибка среднего; V – коэффициент вариации, %.

Note. n – total sample, pcs.; M ± m – arithmetic mean ± error of the mean; V – coefficient of variation, %.

Основным недочетом большинства исследований, связанных с оценкой глубины прогорания на постпирогенных массивах, является игнорирование наличия локальных подземных полостей (каверн) в очагах тления торфа. Одним из решений является зондировка на всю глубину остаточного торфа, что увеличивает трудоемкость работ, но позволяет примерно определить процент площади, содержащей полости или слои золы/обугленного торфа в случае осадки поверхности над полостями.

Для расчета послойных (каждые 10 см) потерь углерода использовали сравнение с аналогичными слоями негоревших почв (табл. 1). Для слоев обугленного и термически измененного торфа повышенной зольности расчет провели по формуле:

$$\text{ПОУ} = ((\text{Сф} - \text{Сп}) \cdot \text{Н} \cdot \text{d}) / 10,$$

где ПОУ – потери органического углерода, кг С/м²; Сф – запасы

углерода в слое x негоревшей почвы (фоновой); $Сп$ – запасы углерода в слое пирогенно-измененной почвы, соответствующем слою x негоревшей почвы; H – толщина слоя, см; d – плотность слоя, г/см³; 10 – коэффициент пересчета на кг С/м².

Путем суммирования послойных запасов получили общие потери для всех вариантов изученных почв на двух участках (табл. 3).

Таблица 3. Суммарные потери органического углерода из торфяных почв при пожарах разной интенсивности

Table 3. Total losses of organic carbon from peat soils during fires of different intensities

Функциональная зона	Интенсивность торфяного пожара по глубине прогорания		
	Слабый	Средний	Сильный
Участок 1			
Торфяные карты	21.20 ± 0.91	36.70 ± 1.88	50.36 ± 3.30
Кавальеры	13.06 ± 1.05	28.43 ± 2.12	63.04 ± 3.51
Участок 2			
Торфяные пустоши	5.41 ± 0.40	24.05 ± 1.33	Очаги отсутствуют
Кавальеры	5.31 ± 1.63	24.53 ± 2.13	65.40 ± 3.22

Регрессионный анализ показал, что существует линейная зависимость потерь углерода из профиля торфяных почв от глубины выгорания (рис. 6).

Следующим шагом явилась экспертная оценка долевого участия очагов пожара разной степени интенсивности в каждой функциональной зоне тестовых участков (рис. 7). Выяснилось, что в наибольшей степени от пожара пострадали кавальеры (приканальная полоса), где расположены основные площади сильных пожаров. Напротив, на торфяных картах и особенно пустошах пожар был слабым с отдельными очагами заглубления, преимущественно подземного со стороны кавальеров.

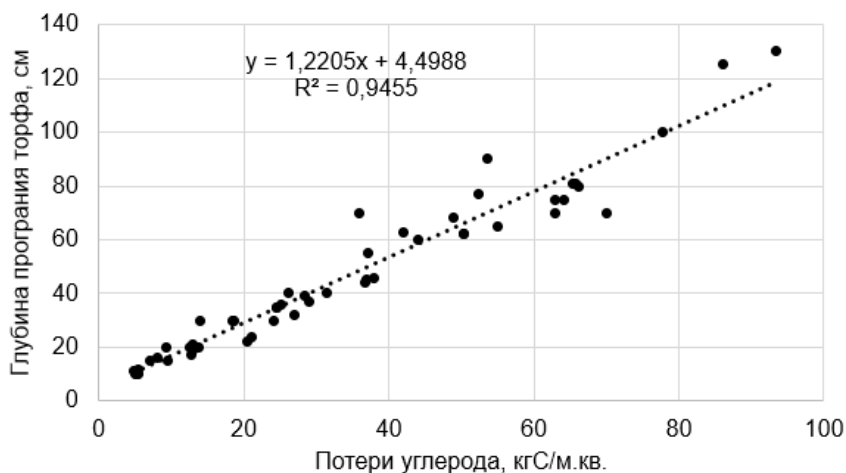


Рис. 6. Диаграмма рассеяния суммарных потерь углерода при различных глубинах выгорания осушенных торфяных почв.

Fig. 6. Scatter diagram of total carbon losses at different depths of peat soil burning.

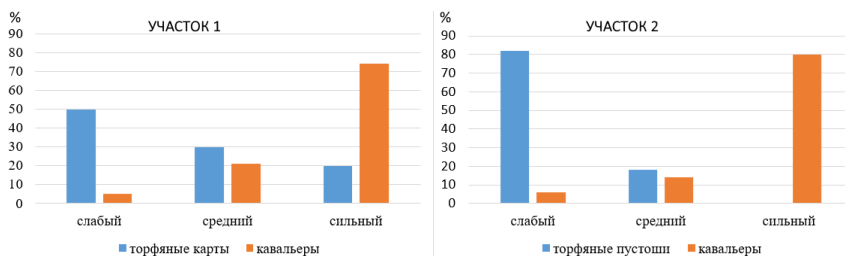


Рис. 7. Долевое участие пожара разной силы по глубине выгорания торфа (% от площади функциональной зоны).

Fig. 7. Share of fires of different intensity in terms of peat burning depth (% of the functional zone area).

Чтобы перейти к площадным потерям углерода необходимо определить вклад разных функциональных зон в общую площадь тестовых участков. На участке 1 кавальеры занимают 28%, а на участке 2 – 36%. Различия зависят от глубины, ширины русла канала и объемов перемещенного из него торфяного грунта. Площадные потери углерода из почв кавальеров составили для участка 1 – 45.3 т С, для участка 2 – 84.7 т С. Таким образом, очаг наиболее интенсивного по глубине пожара пришелся на зону кавальеров участка 2, которые выгорели практически полностью (на 80%) вплоть до минеральной подстилающей породы. Максимальная зафиксированная глубина выгорания составила 160 см. При этом полностью обнажились керамические трубы-коллекторы (диаметром 20–30 см) осушительной системы на протяжении 10–12 м от бровки канала в сторону торфяника. Сильный нагрев привел к трещинам в корпусе труб, а выгорание торфа под ними – к деформации уклона. Мелкие пластиковые гофрированные осушители полностью сгорели в очаге пожара, сохранились лишь частично на периферии в сильно деформированном виде с оплавленными краями. По примерным расчетам, согласно уравнению полного сгорания углерода с образованием CO_2 , только в этом очаге при пожаре выделилось $16.8 \cdot 10^4 \text{ м}^3$ газа.

Ряд исследователей отмечает, что наличие в торфяной залежи низкочольных верховых торфов способствует тому, что возгорание начинается при более низких температурах (300 °С) по сравнению с низинными торфами (Смолянинов и др., 1977). Это как раз иллюстрирует ситуацию, позволяющую реконструировать обстановку на торфянике в начальные фазы пожара. На кавальерах участка 2 слой верхового фускум-торфа составлял исходно не менее 70 см. Именно в этой зоне и обнаруживаются очаги максимального выгорания. Однако, достигнув более водонасыщенных слоев торфа на торфяных пустошах, интенсивность пожара резко снизилась. Так сформировалась контрастная картина между глубокими котловинами выгорания в зоне кавальеров, заканчивающимися почти отвесными обугленными бортами по границе с торфяными пустошами. Отдельные очаги подземных пожаров проникли вглубь торфяной залежи по границе переходных торфов и находились в тлеющем состоянии, по-видимому, долгое время.

Реализация такого сценария развития торфяного пожара привела в тому, что на участке 2 вклад потерь углерода из почв кавальеров в пересчете на исследованную площадь составляет 78.2%. На торфяные пустоши приходится 21.8% вследствие поверхностного воздействия пожара. В абсолютных величинах пирогенные потери почвенного углерода с участка 2 площадью 0.42 га составили 108.3 т С.

На участке 1 пожар развивался по другому сценарию. Здесь глубокое выгорание почв на кавальерах сопровождалось распространением пожара на всю площадь торфяных карт. Причина этого – большой периметр кавальеров. Дело в том, что фронт пожара на участке 2 шел только по восточной границе вдоль магистрального канала, так как на изученной части торфяных пустошей нет открытых мелких каналов с карт. Дренажный сток осуществлялся по подземным коллекторам, идущим от концевых частей картовых каналов. На участке 1 в магистральный канал под прямым углом впадают три картовых канала, вдоль бортов которых располагаются полосы невысоких кавальеров. Пожар, придя со стороны магистрального канала, быстро распространился по сухим почвам кавальеров картовых канав и проник вглубь торфяника. Каждая торфяная карта оказалась со всех сторон окруженной очагами пожаров. Поэтому на участке 1 наблюдалось очень длительное горение, особенно за счет подземного тления. Длина границ пожара по всем кавальерам на участке 1 составляла 134 м, а на участке 2 – 250 м. Такая ситуация привела к высоким потерям углерода из почв торфяных карт участка 1 за счет более глубокого пирогенного поражения. Вклад потерь углерода с кавальеров составил 39.9%, а с торфяных карт – 60.1%. Общие потери с участка 1 площадью 0.3 га оцениваются в 113.4 т С.

Таким образом, показано, что чем гуще сеть открытых осушительных каналов на торфяных почвах, тем больше потери углерода вследствие более быстрого распространения пожара по кавальерам вглубь торфяника.

ВЫВОДЫ

1. Впервые на выработанных торфяных месторождениях Калининградской области (с гумидным климатом бореального

пояса Юго-Восточной Прибалтики) было проведено комплексное изучение пирогенно-измененных почв и оценены потери углерода в результате многоочаговых пожаров. Примененная методология позволила сопоставить степень пирогенной деградации болотных почв с российской классификацией торфяных пожаров по глубине выгорания и логично сгруппировать основные варианты профилей пирогенно-измененных почв по трем классам пожаров от слабого до сильного.

2. Пирогенная деградация почв при слабых пожарах (при глубине выгорания до 25 см) характеризуется уменьшением мощности профиля на 10–20 см вследствие поверхностного воздействия огня с формированием обугленного горизонта. В таких условиях на лесопокрытых участках наиболее эффективно применение метода определения глубины прогорания и послепожарной осадки почвы по положению корневой шейки деревьев с наличием ожога. Потери углерода в очагах слабого пожара варьируют от 5.31 до 21.20 кг С/м² в зависимости от глубины выгорания, исходных запасов углерода, плотности, типа и зольности торфа.

3. При пожаре средней силы (глубина выгорания 25–50 см) пирогенная деградация профиля болотных почв на изученной торфовойработке затрагивает как поверхностные, так и глубокие горизонты, что выражается в уменьшении мощности профиля и формировании полостей подземного выгорания. Потери углерода составляют 24.05– 6.70 кг С/м².

3. В очагах сильного пожара (глубина выгорания свыше 50 см) происходит практически полное уничтожение торфяных верховых и переходных почв с исходной мощностью торфа 100–140 см и образование на их месте сильно укороченных (20–40 см) пирогенных или пирогенно-остаточно-торфянистых почв, которые приурочены к глубоким ямам и котловинам. Потери углерода при этом максимальные и оцениваются в 50.36–65.40 кг С/м².

4. Установлено, что очаги сильных пожаров концентрируются в приканальной полосе разравнивания кавальеров. Повышенная мощность торфяного слоя на кавальерах, сложенных малозольными торфами и их возвышенное положение относительно выработанных торфяных карт приводят к быстрому иссушению почв и их возгоранию под влиянием природных или антропоген-

ных факторов.

5. В распространении фронта пожара большую роль играет густота осушительной сети из мелких картовых каналов. Частое расположение открытых осушителей через 20–40 м на окраинах торфовабработок способствует быстрому проникновению пожара вдоль кавальеров вглубь торфяных карт, заглублению огня и длительному последующему тлению с образованием мелких подземных полостей выгорания. При этом потери углерода с площади торфяных карт превышают потери с кавальеров. В случае, когда фронт пожара после захвата кавальеров выходит на площадь без открытых каналов (только с подземными осушителями и более сырой торфяной залежью) интенсивность горения, по-видимому, ослабевает. Основные потери углерода при таком сценарии связаны с выгоранием почв на кавальерах, а на торфяных картах пожар оценивается как слабый по глубине прогорания.

6. Используемая методика на основе оценки пирогенной деградации почв и по группам интенсивности торфяных пожаров может быть применена для разнообразных ландшафтных условий, что позволит выработать региональные и общие шкалы пирогенных потерь углерода в зависимости от исходного типа торфа, глубины выгорания с учетом специфики способа осушения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Анциферова О.А.* Почвы Замландского полуострова и их антропогенное изменение. Часть 2. Дерново-глеевые, аллювиальные, болотные, постпланировочные, городские почвы. Структура почвенного покрова. Калининград: Изд-во ФГБОУ ВПО «КГТУ». 2008. 424 с.
2. *Вадюнина А.Ф., Корчагина З.А.* Методы исследования физических свойств почв. М.: Агропромиздат. 1986. 415 с.
3. Географический атлас Калининградской области / Гл. ред. *В.В. Орленок*. Калининград: Изд-во КГУ. 2002. 276 с.
4. *Глухова Т.В., Сирин А.А.* Потери почвенного углерода при пожаре на осушенном лесном верховом болоте // Почвоведение. 2018. № 5. С. 580–588. DOI: <https://doi.org/10.7868/S0032180X18050076>.
5. ГОСТ 11306. Торф и продукты его переработки. Методы определения зольности. М.: Росстандарт, 2013. 8 с.

6. Гришин А.М., Голованов А.Н., Суков Я.В., Прейс Ю.И. Экспериментальное исследование процессов зажигания и горения торфа // Инженерно-физический журнал. 2006. Т. 79. № 3. С. 137–142.
7. Ефремова Т.Т., Пименов А.В., Ефремов С.П., Аврова А.Ф. Постпирогенная мозаичность физико-химических свойств и потерь углерода в лесных почвах заболоченной долины Кузнецкого Алатау // Сибирский лесной журнал. 2021. № 6. С. 18–29. DOI: <https://doi.org/10.15372/SJFS20210602>.
8. Зайдельман Ф.Р. Методы эколого-мелиоративных изысканий и исследований почв. М.: КолосС. 2008. 486 с.
9. Зайдельман Ф.Р., Романов С.В. Эколого-гидротермическая оценка пирогенных почв выработанных торфяных месторождений // Почвоведение. 2007. № 1. С. 93–105.
10. Зайдельман Ф.Р., Шваров А.П. Пирогенная и гидротермическая деградация торфяных почв, их агроэкология, песчаные культуры земледелия, рекультивация. М.: Изд-во МГУ. 2002. 168 с.
11. Залесов С.В. Лесная пирология. Екатеринбург: УГЛТУ, 2021. 396 с.
12. Исаева Л.К., Наместникова О.В., Соловьёв С.В., Сулименко В.А., Шилин С.А. Пожарная и экологическая опасность торфяников // Пожары и чрезвычайные ситуации: предотвращение, ликвидация. 2010. № 3. С. 29–35.
13. Калининградская область. Географический атлас / Гл. ред. В. Орленок, Г. Федоров. Калининград: Мастерская “Коллекция”, 2011. 96 с.
14. Карбоновые полигоны: мониторинг, геоинформационные системы, секвестрационные технологии / Под ред. С.К. Гулева, А.В. Ольчева. М.: Научный мир, 2025. 420 с.
15. Классификация и диагностика почв СССР / Сост. В.В. Егоров, В.М. Фридланд, Е.Н. Иванова, Н.Н. Розов. М.: Колос, 1977. 224 с.
16. Конюшков Д.Е., Ананко Т.В., Герасимова М.И., Савицкая Н.В., Чуванов С.В. Анализ почвенного покрова России по карте масштаба 1:2.5 млн с использованием новой классификации: отделы почв и их площади // Бюллетень Почвенного института им. В.В. Докучаева. 2022. Вып. 112. С. 73–121. DOI: <https://doi.org/10.19047/0136-1694-2022-112-73-121>.
17. Курбатский Н.П. Техника и тактика тушения лесных пожаров. М.: Гослесбумиздат, 1962. 154 с.
18. Медведева М.А., Иткин В.Ю., Сиринов А.А. Анализ показателей температурных аномалий для выявления торфяных пожаров // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2023. Т. 20. № 6. С. 92–116. DOI: <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2023-20-6-92-116>.

19. Методика тушения ландшафтных пожаров (утв. МЧС 14 сентября 2015 г. № 2-4-87-32-ЛБ). М., 2015. 48 с.
20. Мокряк А.В., Парийская А.Ю. Проблемы тлеющих торфяных пожаров в лесах и Арктике // Международный научно-исследовательский журнал. 2021. № 10. С. 159–162. DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2021.112.10.027>.
21. Пономарева В.В., Плотникова Т.А. Методические указания по определению содержания и состава гумуса в почвах (минеральных и торфяных). Л.: Изд-во ВАСХНИЛ, 1975. 105 с.
22. Природа Калининградской области. Водные объекты (Балтийское море, лагуны, болота). Справочное пособие / Сост. В.А. Медведев, Ф.Е. Алексеев. Калининград: Исток, 2015. 104 с.
23. Рекомендации по тушению осушенных торфяных болот / Г.В. Куксин, М.Л. Крейндин, Ю.Б. Петренко и др. М.: ФАУ ДПО ВИПКЛХ, 2020. 109 с.
24. Сирин А.А., Макаров Д.А., Гуммерт И., Маслов А.А., Гульбе Я.И. Глубина прогорания торфа и потери углерода при лесном подземном пожаре // Лесоведение. 2019. № 5. С. 410–422. DOI: <https://doi.org/10.1134/S0024114819050097>.
25. Смольянинов С.И., Белихмайер А.Я., Икрин В.М. Кинетика газовыделения при термическом разложении торфа // Известия Томского политехнического института. 1977. Т. 300. С. 13–15.
26. Способы тушения торфяных пожаров / С.В. Залесов, Г.В. Куксин, И.М. Секерин. Екатеринбург: УГЛТУ, 2024. 89 с.
27. Торф: возгорание торфа, тушение торфяников и торфокомпозиаты / Л.Б. Хорошавин, О.А. Медведев, В.А. Беляков и др. М.: ФГБУ ВНИИ ГОЧС (ФЦ), 2013. 256 с.
28. Торфяной фонд Калининградской области / Отв. ред. А.С. Оленин. М., 1952. 100 с.
29. Чернова О.В., Рыжова И.М., Подвезенная М.А. Опыт региональной оценки изменений запасов углерода в почвах южной тайги и лесостепи за исторический период // Почвоведение. 2016. № 8. С. 1013–1028.
30. Щепаченко Д.Г., Мухомотова Л.В., Швиденко А.З., Ведрова Э.Ф. Запасы органического углерода в почвах России // Почвоведение. 2013. № 2. С. 123–132.
31. Antsiferova O., Napreenko M.; Napreenko-Dorokhova T. Transformation of Soils and Mire Community Reestablishment Potential in Disturbed Abandoned Peatland: A Case Study from the Kaliningrad Region, Russia // Land. 2023. No. 12. Vol. 1880. DOI: <https://doi.org/10.3390/land12101880>.
32. Che Azmi N.A., Mohd Apandi N.A., Rashid A.S. Carbon emissions from the peat fire problem – a review // Environ Sci Pollut Res. 2021. Vol. 28. P. 16948–16961. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11356-021-12886-x>.

33. *Davies G.M., Gray A., Rein G., Legg C.J.* Peat consumption and carbon loss due to smouldering wildfire in a temperate peatland // *Forest Ecology and Management*. 2013. Vol. 308. P. 169–177.
34. *Hudspith V.A., Belcher C.M., Yearsley J.M.* Charring temperatures are driven by the fuel types burned in a peatland wildfire // *Front. Plant Sci.* 2014. Vol. 5. DOI: <https://doi.org/10.3389/fpls.2014.00714>.
35. *Napreenko M., Kileso A., Napreenko-Dorokhova T., Antsiferova O., Bashirova L., Goltvert G.* Carbon flux inventories on disturbed peatlands as part of the Carbon Supersite Programme in the Baltic Region // *Int. J. Environ. Sci. Technol.* 2024. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13762-024-06200-8>.
36. *Poulter B., Christensen N.L., Halpin P.N.* Carbon emissions from a temperate peat fire and its relevance to interannual variability of trace atmospheric greenhouse gases // *J. Geophys. Res.* 2006. Vol. 111. Iss. 6. P. 11.
37. *Reddy A.D., Hawbaker T.J., Wurster F., Zhua Z., Wardd S., Newcombd D., Murray R.* Quantifying soil carbon loss and uncertainty from a peatland wildfire using multi-temporal // *Remote Sensing of Environment*. 2015. Vol. 170. P. 306–316.
38. *Rein G., Huang X.* Smouldering wildfires in peatlands, forests and the arctic: Challenges and perspectives // *Current Opinion in Environmental Science & Health*. 2021. Vol. 24. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.coesh.2021.100296>.
39. *Schmidt A., Ellsworth L.M., Boisen G.A., Novita N., Malik A., Gangga A., Albar I., Dwi Nurhayati A., Putra R.R., Asyhari A. and Kauffman J.B.* Fire frequency, intensity, and burn severity in Kalimantan's threatened Peatland areas over two Decades // *Front. For. Glob. Change*. 2024 Vol. 7. DOI: <https://doi.org/10.3389/ffgc.2024.1221797>.
40. *Sirin, A., Maslov A., Makarov D., Gulbe Y., Joosten H.* Assessing Wood and Soil Carbon Losses from a Forest-Peat Fire in the Boreo-Nemoral Zone // *Forests*. 2021. No. 12. Vol. 880. DOI: <https://doi.org/10.3390/f12070880>.
41. *Turetsky M.R., Benscoter B., Page S., Rein G., van der Werf G.R., Watts A.* Global vulnerability of peatlands to fire and carbon loss // *Nature Geoscience*. 2015. Vol. 8(1). P. 11–14. DOI: <https://doi.org/10.3390/f1207088010.1038/ngeo2325>.
42. *Turetsky M.R., Wieder R.K.* A direct approach to quantifying organic matter lost as a result of peatland wildfire // *Can. J. Forest Res.* 2001. Vol. 31. P. 363–366. DOI: <https://doi.org/10.1139/cjfr-31-2-363>.
43. *Wilkinson S.L., Andersen R., Moore P.A., Davidson S.J., Granath G., Waddington J.M.* Wildfire and degradation accelerate northern peatland carbon release // *Nat. Clim. Chang*. 2023. Vol. 13. P. 456–460. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41558-023-01657-w>.
44. World reference base for soil resources 2014 International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps /

Anjos L., Gaistardo C., Deckers J., Dondeyne S., Eberhardt E., Gerasimova M., Harms B., Jones A., Krasilnikov P., Reinsch T., Vargas R., Zhang G. Ed. Schad P., Van Huyssteen C., Micheli E. Rome (Italy). FAO. 2015. 192 p.

REFERENCES

1. Antsiferova O.A., *Pochvy Zamlandskogo poluostrova i ikh antropogennoye izmeneniye. Chast' 2. Dernovo-gleyevyye, allyuvial'nyye, bolotnyye, postplanirovochnyye, gorodskiyе pochvy. Struktura pochvennogo pokrova* (Soils of the Samland Peninsula and their anthropogenic change. Part 2. Sod-gley, alluvial, bog, post-planning, urban soils. Soil cover structure), Kaliningrad: Izd-vo FGBOU VPO "KGTU", 2008, 424 p.
2. Vadyunina A.F., Korchagina Z.A., *Metody issledovaniya fizicheskikh svoystv pochv* (Methods for studying the physical properties of soils), Moscow: Agropromizdat, 1986, 415 p.
3. Orlyonok V.V. (Ed.), *Geograficheskiy atlas Kaliningradskoy oblasti* (Geographical atlas of the Kaliningrad region), Kaliningrad: Izd-vo KGU, 2002, 276 p.
4. Glukhova T.V., Sirin A.A., Poteri pochvennogo ugleroda pri pozhare na osushennom lesnom verkhovom bolote (Losses of soil carbon during a fire in a drained forested raised bog), *Pochvovedeniye*, 2018, No. 5, pp. 580–588, DOI: <https://doi.org/10.7868/S0032180X18050076>.
5. GOST 11306. *Torf i produkty ego pererabotki. Metody opredeleniya zol'nosti* (State standard of the Russian Federation 11306. Peat and its processed products. Methods for determining ash content), Moscow, Rosstandart, 2013, 8 p.
6. Grishin A.M., Golovanov A.N., Sukov Ya.V., Preys Yu.I., Eksperimental'noye issledovaniye protsessov zazhiganiya i goreniya torfa (Experimental study of peat ignition and combustion processes), *Inzhenerno-fizicheskiy zhurnal*, 2006, Vol. 79, No. 3, pp. 137–142.
7. Efremova T.T., Pimenov A.V., Efremov S.P., Avrova A.F., Postpirogennaya mozaichnost' fiziko-khimicheskikh svoystv i poter' ugleroda v lesnykh pochvakh zabolochennoy doliny Kuznetskogo Alatau (Post-pyrogenic mosaicism of physicochemical properties and carbon losses in forest soils of the swampy valley of the Kuznetsk Alatau), *Sibirskiy lesnoy zhurnal*, 2021, No. 6, pp. 18–29, DOI: <https://doi.org/10.15372/SJFS20210602>.
8. Zaydel'man F.R., *Metody ekologo-meliorativnykh izyskaniy i issledovaniy pochv* (Methods of ecological and meliorative surveys and soil studies), Moscow: KolosS, 2008, 486 p.
9. Zaydel'man F.R., Romanov S.V., Ekologo-gidrotermicheskaya otsenka

pirogennykh pochv vyrabotannykh torfyanykh mestorozhdeniy (Ecological and hydrothermal assessment of pyrogenic soils of developed peat deposits), *Pochvovedeniye*, 2007, No. 1, pp. 93–105.

10. Zaydel'man F.R., Shvarov A.P., *Pirogennaya i gidrotermicheskaya degradatsiya torfyanykh pochv, ikh agroekologiya, peschanyye kul'tury zemledeliya, rekul'tivatsiya* (Pyrogenic and hydrothermal degradation of peat soils, their agroecology, sandy crops of agriculture, reclamation), Moscow: Izd-vo MGU, 2002, 168 p.

11. Zalesov S.V., *Lesnaya pirologiya* (Forest pyrology), Ekaterinburg: UGLTU, 396 p.

12. Isaeva L.K., Namestnikova O.V., Solovyov S.V., Sulimenko V.A., Shilin S.A., *Pozharnaya i ekologicheskaya opasnost' torfyanikov* (Fire and environmental hazards of peatlands), *Pozhary i chrezvychaynyye situatsii: predotvrashcheniye, likvidatsiya*, 2010, No. 3, pp. 29–35.

13. Orlenok V., Fedorov G. (Ed.), *Kaliningradskaya oblast', Geograficheskiy atlas* (Kaliningrad Region. Geographical Atlas), Kaliningrad: Masterskaya "Kollektsiya", 2011, 96 p.

14. Guleva S.K., Ol'cheva A.V. (Ed.), *Karbonovyye poligony: monitoring, geoinformatsionnyye sistemy, sekvestratsionnyye tekhnologii* (Carbon polygons: monitoring, geoinformation systems, sequestration technologies), Moscow: Nauchnyy mir, 2025, 420 p.

15. Egorov V.V., Fridland V.M., Ivanova E.N., Rozov N.N., *Klassifikatsiya i diagnostika pochv SSSR* (Classification and diagnostics of soils of the USSR), Moscow: Kolos, 1977, 224 p.

16. Konyushkov D.E., Ananko T.V., Gerasimova M.I., Savitskaya N.V., Chuvanov S.V., Soil orders and their areas on the updated soil map of the Russian Federation, 1 : 2.5 M scale, *Dokuchaev Soil Bulletin*, 2022, Vol. 112, pp. 73–121, DOI: <https://doi.org/10.19047/0136-1694-2022-112-73-121>.

17. Kurbatskiy N.P., *Tekhnika i taktika tusheniya lesnykh pozharov* (Technique and tactics of extinguishing forest fires), Moscow: Goslesbumizdat, 1962, 154 p.

18. Medvedeva M.A., Itkin V.Yu., Sirin A.A., *Analiz pokazateley temperaturnykh anomalii dlya vyyavleniya torfyanykh pozharov* (Analysis of temperature anomaly indicators for detecting peat fires), *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2023, Vol. 20, No. 6, pp. 92–116, DOI: <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2023-20-6-92-116>.

19. *Metodika tusheniya landshaftnykh pozharov* (Methodology for extinguishing landscape fires) (approved by the Ministry of Emergency Situations on September 14, 2015 No. 2-4-87-32-LB), Moscow, 2015, 48 p.

20. Mokryak A.V., Pariyskaya A.Yu., *Problemy tleyushchikh torfyanykh pozharov v lesakh i Arktike* (Problems of smoldering peat fires in forests and

the Arctic), *Mezhdunarodnyy nauchno-issledovatel'skiy zhurnal*, 2021, No. 10, pp. 159–162, DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2021.112.10.027>.

21. Ponomareva V.V., Plotnikova T.A., *Metodicheskiye ukazaniya po opredeleniyu soderzhaniya i sostava gumusa v pochvakh (mineral'nykh i torfyanykh)* (Methodical instructions for determining the content and composition of humus in soils (mineral and peat)), Leningrad: Izd-vo VASKHNIL, 1975, 105 p.

22. Medvedev V.A., Alekseyev F.Ye. (compilation), *Priroda Kaliningradskoy oblasti. Vodnyye ob'yekty (Baltiyskoye more, laguny, bolota). Spravochnoye posobiye* (Nature of the Kaliningrad Region. Water Bodies (the Baltic Sea, Lagoons, Marshes). Reference Manual), Kaliningrad: Istok, 2015, 104 p.

23. Kuksin G.V., Kreydlin M.L., Petrenko Yu.B. et al., *Rekomendatsii po tusheniyu torfyanykh bolot* (Recommendations for extinguishing drained peat bogs), Moscow: FAU DPO VIPKLH, 2020, 109 p.

24. Sirin A.A., Makarov D.A., Gummert I., Maslov A.A., Gul'be Ya.I., Glubina progoraniya torfa i poteri ugleroda pri lesnom podzemnom pozhare (Depth of peat combustion and carbon losses during underground forest fire), *Lesovedenie*, 2019, No. 5, pp. 410–422, DOI: <https://doi.org/10.1134/S0024114819050097>.

25. Smol'yaninov S.I., Belikhmayyer A.Ya., Ikrin V.M., *Kinetika gazovydeleniya pri termicheskom razlozhenii torfa* (Kinetics of gas evolution during thermal decomposition of peat), *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo instituta*, 1977, Vol. 300, pp. 13–15.

26. Zalesov S.V., Kuksin G.V., Sekerin I.M. *Sposoby tusheniya torfyanykh pozharov* (Methods of extinguishing peat fires), Ekaterinburg: UGLTU, 2024, 89 p.

27. Khoroshavin L.B., Medvedev O.A., Belyakov V.A., *Torf: vozgoraniye torfa, tusheniye torfyanikov i torfokompozity* (Peat: peat fires, peatland fire extinguishing and peat composites), EMERCOM of Russia, Moscow: FGBU VNII GOCHS (FTS), 2013, 256 p.

28. Olenin A.S., *Torfyanyy fond Kaliningradskoy oblasti* (The Peat Stock Cadastre of the Kaliningrad Region), Moscow, 1952, 100 p.

29. Chernova O.V., Ryzhova I.M., Podvezennaya M.A., *Opyt regional'noy otsenki izmeneniy zapasov ugleroda v pochvakh yuzhnoy taygi i lesostepi za istoricheskiy period* (Experience of regional assessment of changes in carbon reserves in soils of the southern taiga and forest-steppe over the historical period), *Pochvovedeniye*, 2016, No. 8, pp. 1013–1028.

30. Shchepashchenko D.G., Mukhortova L.V., Shvidenko A.Z., Vedrova E.F., *Zapasy organicheskogo ugleroda v pochvakh Rossii* (Organic carbon reserves in soils of Russia), *Pochvovedeniye*, 2013, No. 2, pp. 123–132.

31. Antsiferova O., Napreenko M.; Napreenko-Dorokhova T., Transformation

- of Soils and Mire Community Reestablishment Potential in Disturbed Abandoned Peatland: A Case Study from the Kaliningrad Region, Russia, *Land*, 2023, No. 12, Vol. 1880, DOI: <https://doi.org/10.3390/land12101880>.
32. Che Azmi N.A., Mohd Apandi N.A., Rashid A.S., Carbon emissions from the peat fire problem – a review, *Environ Sci Pollut Res*, 2021, Vol. 28, pp. 16948–16961, DOI: <https://doi.org/10.1007/s11356-021-12886-x>.
33. Davies G.M., Gray A., Rein G., Legg C.J., Peat consumption and carbon loss due to smouldering wildfire in a temperate peatland, *Forest Ecology and Management*, 2013, Vol. 308, pp. 169–177.
34. Hudspith V.A., Belcher C.M., Yearsley J.M., Charring temperatures are driven by the fuel types burned in a peatland wildfire, *Front. Plant Sci.*, 2014, Vol. 5, DOI: <https://doi.org/10.3389/fpls.2014.00714>.
35. Napreenko M., Kileso A., Napreenko-Dorokhova T., Antsiferova O., Bashirova L., Goltsvert G., Carbon flux inventories on disturbed peatlands as part of the Carbon Supersite Programme in the Baltic Region, *Int. J. Environ. Sci. Technol*, 2024, DOI: <https://doi.org/10.1007/s13762-024-06200-8>.
36. Poulter B., Christensen N.L., Halpin P.N., Carbon emissions from a temperate peat fire and its relevance to interannual variability of trace atmospheric greenhouse gases, *Journal Geophys. Res*, 2006, Vol. 111, Iss. 6, pp. 11.
37. Reddy A.D., Hawbaker T.J., Wurster F., Zhua Z., Wardd S., Newcombd D., Murray R., Quantifying soil carbon loss and uncertainty from a peatland wildfire using multi-temporal, *Remote Sensing of Environment*, 2015, Vol. 170, pp. 306–316.
38. Rein G., Huang X., Smouldering wildfires in peatlands, forests and the arctic: Challenges and perspectives, *Current Opinion in Environmental Science & Health*, 2021, Vol. 24, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.coesh.2021.100296>.
39. Schmidt A., Ellsworth L.M., Boisen G.A., Novita N., Malik A., Gangga A., Albar I., Dwi Nurhayati A., Putra R.R., Asyhari A., Kauffman J.B., Fire frequency, intensity, and burn severity in Kalimantan's threatened Peatland areas over two Decades, *Front. For. Glob. Change*, 2024, Vol. 7, DOI: <https://doi.org/10.3389/ffgc.2024.1221797>.
40. Sirin A., Maslov A., Makarov D., Gulbe Y., Joosten H., Assessing Wood and Soil Carbon Losses from a Forest-Peat Fire in the Boreo-Nemoral Zone, *Forests*, 2021, No. 12, Vol. 880, DOI: <https://doi.org/10.3390/f12070880>.
41. Turetsky M.R., Benscoter B., Page S., Rein G., van der Werf G.R., Watts A., Global vulnerability of peatlands to fire and carbon loss, *Nature Geoscience*, 2015, Vol. 8(1), pp. 11–14, DOI: <https://doi.org/10.3390/f1207088010.1038/ngeo2325>.
42. Turetsky M.R., Wieder R.K., A direct approach to quantifying organic

matter lost as a result of peatland wildfire, *Can. J. Forest Res*, 2001, Vol. 31, pp. 363–366, DOI: <https://doi.org/10.1139/cjfr-31-2-363>.

43. Wilkinson S.L., Andersen R., Moore P.A., Davidson S.J., Granath G., Waddington J.M., Wildfire and degradation accelerate northern peatland carbon release, *Nat. Clim. Chang*, 2023, Vol. 13, pp. 456–460, DOI: <https://doi.org/10.1038/s41558-023-01657-w>.

44. *World reference base for soil resources 2014 International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps*, Anjos L., Gaistardo C., Deckers J., Dondeyne S., Eberhardt E., Gerasimova M., Harms B., Jones A., Krasilnikov P., Reinsch T., Vargas R., Zhang G. (Ed.), Schad P., Van Huyssteen C., Micheli E. Rome (Italy), FAO, 2015, 192 p.