

УДК 630+582.632

ГЛУБИНА ПРОГОРАНИЯ ТОРФА И ПОТЕРИ УГЛЕРОДА ПРИ ЛЕСНОМ ПОДЗЕМНОМ ПОЖАРЕ¹

© 2019 г. А. А. Сирин^а, *, Д. А. Макаров^а, И. Гуммерт^б, А. А. Маслов^а, Я. И. Гульбе^а^аИнститут лесоведения Российской академии наук,
Россия, 143030, Советская 21, п/о Успенское, Московская обл.^бУниверситет Грайфсвальда,
Германия, D-17487, Зольдманштрассе 15, Грайфсвальд

*E-mail: sirin@ilan.ras.ru

Поступила в редакцию 13.02.2019 г.

После доработки 29.04.2019 г.

Принята к публикации 05.06.2019 г.

Среди лесных пожаров подземные (торфяные) лидируют по объему сгораемого материала на единицу площади и, соответственно, влиянию на изменение климата, однако отличаются сложностью оценки потерь почвенного углерода и поступления его в атмосферу. На примере гари лесоторфяного пожара 2010 г. в Московской области площадью 9 га с различным составом исходного древостоя определены глубина прогорания и потери почвенного углерода путем восстановления допожарной поверхности почвы по корневой шейке пней, а также сравнения характеристик торфа на сгоревших и прилегающих к гари площадях. Средняя (медиана) глубины прогорания составила 15 ± 8 (14) см при варьировании на разных участках от 13 ± 5 (11) до 20 ± 9 (19) см. Глубина прогорания возрастала с относительной высотой поверхности и была максимальной на участках с преобладанием осины. По данным послойного определения объемного веса, зольности и содержания углерода в торфе получены зависимости запаса углерода от мощности торфа. На их основе, а также по данным глубины прогорания оценены потери углерода, которые составили для гари в среднем (медиана) 9.8 ± 5.57 (9.22) кг м⁻² при варьировании на разных участках от 8.61 ± 3.75 (7.39) до 12.9 ± 6.18 (12.3) кг м⁻², что равноценно единовременному выбросу почти 400 т CO₂ га⁻¹ и, как минимум, в 1.5 раза выше возможного поступления CO₂ в атмосферу от потери углерода биомассы произрастающего здесь древостоя с запасом стволовой древесины более 280 м³ га⁻¹. Результаты соответствуют верхней границе оценок потерь почвенного углерода, полученных зарубежными авторами, и подтверждают недооцененность фактора подземных (торфяных) пожаров в бореальной зоне по сравнению с тропиками и в целом при рассмотрении влияния лесных и болотных экосистем на газовый состав атмосферы и климат.

Ключевые слова: лесные пожары, подземные пожары, торфяные пожары, болота, торф, углерод, изменение климата, парниковые газы, диоксид углерода.

DOI: 10.1134/S0024114819050097

Лесные пожары оказывают огромное влияние на газовый состав атмосферы как в результате “пожарных” эмиссий, происходящих непосредственно при пожарах, так и в ходе дальнейших экологических изменений на гаях (Исаев и др., 1995). Особыми последствиями отличаются подземные (торфяные) пожары, возникающие при

распространении низовых и верховых возгораний в торфяные почвы. Проникая глубоко в торфяную почву, огонь повреждает корни деревьев и способствует гибели древостоя (Вомперский и др., 2007), а с учетом высокой заболоченности лесной зоны и значительной доли покрытия болот и заболоченных мелкоотторфованных земель лесной и редколесной растительностью (Вомперский и др., 2011), вероятность возникновения и распространения лесных торфяных пожаров весьма значительна.

Торфяные пожары лидируют среди всех так называемых природных пожаров по величине сгораемого материала на единицу площади (Huang, Rein, 2017). Поступление углерода в атмосферу в результате торфяных пожаров может до-

¹ Исследование проведено при финансовой поддержке проекта “Восстановление торфяных болот в России в целях предотвращения пожаров и смягчения изменений климата”, финансируемого в рамках Международной климатической инициативы Федеральным министерством окружающей среды, охраны природы и безопасности ядерных реакторов Федеративной Республики Германия и управляемого через немецкий банк развития KfW (проект № 11 III 040 RUS K Восстановление торфяных болот), при частичной поддержке РФФИ (16-05-00762).

стигать 15% всех антропогенных эмиссий (Poulter et al., 2006), причем такие пожары происходят на всех континентах (Hu et al., 2018). В нашей стране торфяные пожары бывают во всех природных зонах, где есть болота (Minaeva et al., 2013), однако наиболее часто они происходят в лесной зоне, где являются естественным фактором развития не только многих лесных, но и нередко болотных экосистем (Минаева, Сирин, 2002; Сирин и др., 2011). Вероятность возникновения и интенсивность торфяных пожаров будут усиливаться из-за изменения климата и антропогенных воздействий (Flannigan et al., 2009; Сирин и др., 2011; Turetsky et al., 2015; Joosten et al., 2016); они рассматриваются как факторы, в наибольшей степени угрожающие болотам лесной зоны (Assessment..., 2008; Минаева, Сирин, 2011; IPBES, 2018).

Указывая на значительное влияние торфяных пожаров на изменение климата, Межправительственная группа экспертов по изменению климата — МГЭИК (IPCC 2014, 2013) отмечает сложность учета, методические проблемы и недостаток натурных оценок потерь углерода при торфяных пожарах (Joosten et al., 2016). В отличие от тропиков, данных по торфяным пожарам в нетропических регионах мира и, прежде всего, в таежной зоне существенно меньше, хотя частота пожаров здесь может быть выше, длительность — больше, а последствия — серьезней (Turetsky et al., 2015). В отличие от потерь при сгорании биомассы, оценка которых аналогична оценкам в лесных экосистемах, наиболее сложно определить величину сгорания торфа. Были предложены методы оценки, основанной на разнице концентраций золы в верхнем сгоревшем и нижележащих, не пострадавших горизонтах почвы (Turetsky, Weider, 2001) путем сравнения до- и послепожарной поверхности, определенных по разновременным данным лидара (LiDAR) — лазерного дальномера с высоты более 2 тыс. м (Reddy et al., 2015), а также по положению корневой шейки деревьев (Davies et al., 2013). При небольшом числе оценок потери углерода в результате торфяных пожаров для бореальной зоны — для нашей страны они практически единичны — и были получены путем определения концентрации золы на поверхности сгоревшего торфа (Глухова, Сирин, 2018). В данной работе была сделана попытка оценки потерь почвенного углерода при торфяном пожаре путем восстановления исходной поверхности почвы по положению корневой шейки пней деревьев для верификации и апробации данного метода (Davies et al., 2013) и получения конкретных данных о величине поступления углерода торфа в атмосферу.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДИКА

Объект был определен при обследовании торфяных гарей, образовавшихся после катастрофи-

ческих пожаров 2010 г., в рамках оценки последствий пожаров и эффективности мероприятий по обводнению для предотвращения торфяных пожаров (О состоянии ..., 2016). Он расположен в наиболее заболоченной восточной части Московской области (Сирин и др., 2014), в западной части Мещёрской низменности, в Шатурском районе (55°37'38.75" с.ш., 39°34'32.50" в.д.). Территория относительно выровнена, сильно заболочена, крупные понижения заняты озерами. Многие болота были осушены для добычи торфа, местами — для лесного хозяйства. Вероятно, в первой половине XX в. изучаемый участок был также частично осушен: в восточной части гари, у дороги и в примыкающем с юга лесу сохранились лесомелиоративные каналы. С юга и севера к гари примыкает лес неоднородного состава и возраста с преобладанием березы, осины, ольхи черной и сосны и с небольшим размером условных выделов. На востоке участок граничит с автомобильной дорогой, на западе — с озером.

Участок смешанного леса площадью 9 га летом 2010 г. был пройден низовым и частично верховым пожаром. В условиях экстремальной засухи пожар перешел в категорию подземного (торфяного). Начальная фаза возгорания возле шоссе была зафиксирована на снимке QuickBird от 25.07.2010 г., а к середине августа пожар уже завершился (снимок Landsat 5 от 18.08.2010 г.). Согласно съемке Ikonos от 12.06.2011 г., к началу лета 2011 г. на месте гари образовались завалы из упавших, но лишь частично сгоревших стволов деревьев (рис. 1). К началу наших исследований в 2013 г. объект представлял собой зарастающую вырубку — остатки погибших стволов были распилены и вывезены; сохранились отдельные сухостойные стволы и часть пней погибших деревьев (Маслов и др., 2017).

Сгоревший участок находился вне границ земель лесного фонда, что потребовало проведения специальной работы по восстановлению допозарных характеристик лесных насаждений на гари по данным космической съемки и полевых наблюдений. В результате классификации допозарного снимка Spot 5 на территорию гари и прилегающую несгоревшую территорию получена карта, включающая 6 лесных тематических классов и 1 нелесной (рис. 2). Идентификацию тематических классов (определение видового состава и других характеристик растительности) осуществляли путем лесоводственно-геоботанических описаний в пределах выделов каждого тематического класса вне площади гари. Для расчета запаса стволовой древесины в каждом из этих классов в буферной зоне гари заложили пробные площади, где проводили пересчет деревьев по стандартной методике. Запас стволовой древесины на пробной площади (в пересчете на 1 га) определяли согласно таблицам объема стволов, а

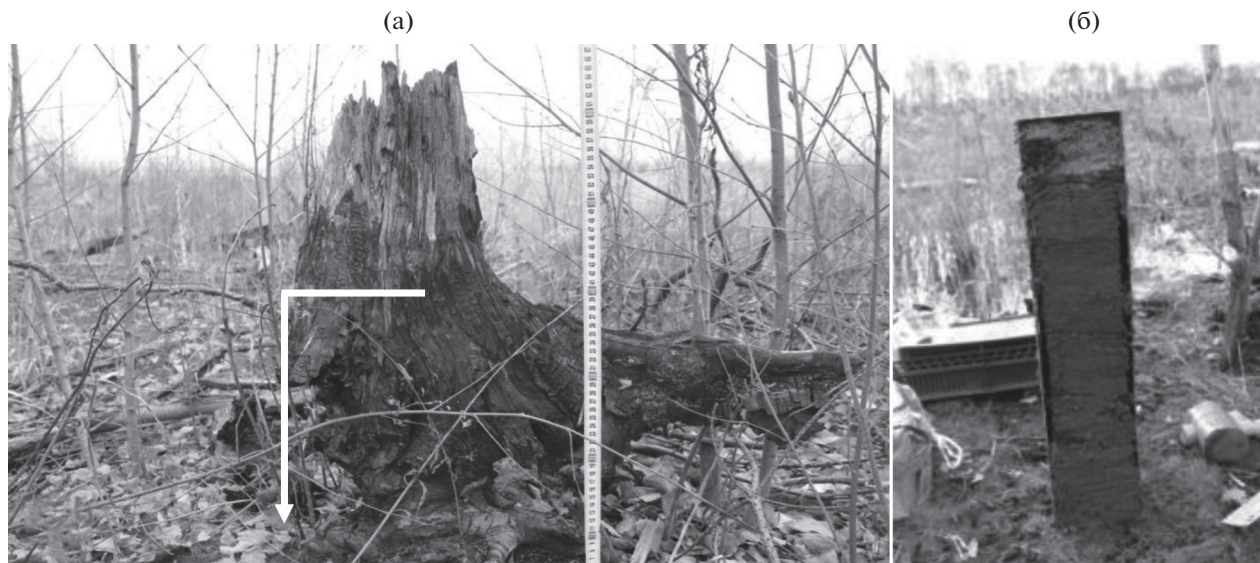


Рис. 1. Восстановление допожарной поверхности уровня почвы по корневой шейке деревьев (а) и отбор образцов торфа для определения объемного веса и других характеристик (б).

для черной ольхи и березы — с использованием регрессионных уравнений. Площадь, занимаемую выделами тематического класса в пределах гари, определяли средствами ГИС (Маслов и др., 2017).

Оказалось, что наибольшую площадь в пределах гари занимают участки смешанных березняков и осинников разного возраста, местами с примесью ольхи черной или сосны. Для понижений мезорельефа характерны заболоченные участки с редкостойной березой и ольхой черной, а также участки с молодняками ольхи. Расчеты потерь углерода в результате гибели древостоя проводились в два этапа. На первом этапе на основе регрессионных моделей определяли массу деревьев по фракциям (для каждой древесной породы). Суммированием этих величин была получена надземная фитомасса деревьев, а также запас и надземная фитомасса различных пород на пробных площадях. Полученные результаты пересчитывались на площадь в 1 га. На втором этапе проводилась конверсия фитомассы в углерод с использованием единых для всех древесных пород коэффициентов: 0.5 — для древесных фракций и 0.45 — для ассимилирующих органов (Уткин и др., 2001). Суммарные потери углерода в абсолютных величинах (на гарь) были получены с учетом площади выделов разных классов в пределах гари.

Для гипсометрической привязки поверхности была проведена нивелировка гари по 7 трансектам, которые пересекались примерно под прямым углом и относительно равномерно покрывали всю площадь участка. Предельное расстояние от нивелира до точек измерения не превышало 150 м, шаг нивелировки составлял 2 м. Изучение стратиграфии залежи проводилось с помощью

бура ТБГ-1 по трансектам, определение мощности залежи — дополнительно торфяным щупом.

Восстановление исходной допожарной поверхности гари проводилось по корневой шейке сохранившихся пней деревьев (Davies et al., 2013). У хорошо сохранившихся пней фиксировали диаметр и брали спилы для установления возраста дерева (рис. 1). Видовая принадлежность была установлена для 306 сохранившихся пней. Эти данные были также использованы для проверки тематических классов, полученных при классификации космоснимка (Маслов и др., 2017). Часть небольших пней была раздавлена тяжелой техникой при разработке гари, некоторые небольшие деревья, видимо, сгорели полностью. Вероятно, наиболее пострадали пни осины, из-за меньшей механической прочности по сравнению с другими породами. Общее число упавших стволов, которое составило 393, было подсчитано по снимку Ikonos 2011 г., сделанному до начала разработки гари (Маслов и др., 2017). Привязка сохранившихся пней проводилась с помощью GPS-приемника Garmin 62s по космическому снимку высокого разрешения Ikonos от 12.06.2011 г. (RGB-синтез с пространственным разрешением 1 м).

Измерение уровня поверхности гари от корневой шейки каждого пня проводилось рулеткой с повторностью 4–5 точек по окружности на расстоянии примерно 50 см от пня. Измерялась глубина прогорания, равная расстоянию от среднего уровня почвы в локальном микрорельефе с участком 2–3 пней до предполагаемого на том же участке уровня почвы до пожара, примерно совпадающего с корневой шейкой дерева. Полученное распределение глубины прогорания на гари стало основанием расчета объема потери торфа.



Рис. 2. Схема классификации древесных насаждений до пожара с расположением пробных площадей. Цифрами обозначены: *а* – сосняк с березой; *б* – березняк с единичной сосной; *в* – осинник с березой и сосной; *г* – осинник с березой и черной ольхой; *д* – березняк с черной ольхой; *е* – черноольшаник; *ж* – нелесные участки, *з* – граница рассматриваемой гари; *и* – пробные площади.

На гари выявлены пни березы, осины, сосны, ольхи черной. Положение корневой шейки относительно поверхности торфяных почв может отличаться для разных пород деревьев и условий местопроизрастания. Для учета этих факторов было определено положение корневой шейки для разных пород деревьев на лесных участках, примыкающих к гари. Результаты показали, что поправка на положение корневой шейки в допожарных условиях необходима, главным образом, для

ольхи черной. При относительно небольшой ее представленности на гари в расчетах этот фактор не учитывался.

Отбор послойных характеристик торфа до глубины 50 см проводился на 8 пробных площадях (пр. пл.) 5×5 метров, расположенных на гари (пр. пл. 3, 4, 7 и 8), и на пробных площадях на примыкающем, не затронутом пожаром участке леса (пр. пл. 1, 2, 5 и 6). Последние характеризуют участки с разным древостоем: на пр. пл. 1 – пре-

обладает береза высотой до 20 м и сосна до 22 м; на пр. пл. 2 — береза до 27 м и сосна до 27 м; на пр. пл. 5 — только ольха черная высотой до 20 м; на пр. пл. 6, непосредственно примыкающей к границе гари, — береза и осина высотой до 25 м.

Пробы торфа отбирались из почвенных разрезов с помощью металлической конструкции из нержавеющей стали П-образной формы шириной 20 см и глубиной 11 см, которая заточенными краями врезалась в боковую стенку разреза (рис. 1). Извлеченный монолит торфа делился на равные горизонты мощностью 5 см, для которых определялась объемная масса в двукратной повторности. Параллельно отбирались образцы для определения ботанического состава и степени разложения торфа. Содержание углерода в образцах определялось по двум навескам сухого измельченного торфа массой 2–3 г; ботанический состав и степень разложения (R) торфа — микроскопическим методом и методом центрифугирования; объемная масса — после высушивания при 105°C; зольность — прокаливанием при температуре 800°C; содержание C — на элементном анализаторе vario MICRO cube (Elementar, Германия), сгорание образца при температуре 1140°C, разделение газов с помощью метода программируемой ступенчатой десорбции — TPD (Temperature Programmed Desorption), в трехкратной повторности.

Обработка данных проводилась в программе Excel, построение поверхностей — в программе Surfer 11 Golden Software, пространственной информации — в ГИС MapInfo.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В северо-западной части гари не было найдено ни одного пня, поэтому она была исключена из анализа, и в результате рассматриваемая площадь гари составила 8.1 га. Согласно стратиграфическим обследованиям, средняя мощность торфа на гари после пожара — 0.9 м, а максимальная (в центре участка) и в лесу за южной границей достигает 1.5 м. В северной части гари мощность залежи уменьшается, и местами на поверхность выходит минеральный грунт. Нивелировка поверхности гари показала, что перепад высот в ее пределах достигает почти 2 м. Высота поверхности растет с юго-запада на северо-восток. Отмечаются отдельные локальные повышения в центре гари, а также в начале и на границе выступающего контура, направленного на запад.

Глубина прогорания торфа

Глубина прогорания была определена для всех выявленных 306 пней деревьев. Путем интерполяции данных по отдельным пням получена регулярная сетка 1 × 1 м значений глубины прогорания торфа, на основании которой построена кар-

та изолиний глубины прогорания торфа (рис. 3), а также с использованием данных нивелировки — карта восстановленной (исходной до пожара) поверхности гари.

Анализ глубины прогорания, полученной для точек расположения пней деревьев, выявил общую тенденцию увеличения прогорания торфа с увеличением относительной высоты восстановленной (исходной до пожара) поверхности почвы (рис. 4). Более интенсивное горение гипсометрически возвышенных участков объяснимо: во-первых, их лучшая дренированность снижает влажность торфа, во-вторых, вероятно, приподнятые участки сильнее подвергаются воздействию огня.

Глубина прогорания значительно варьировала между участками с выделенными условными классами древостоя, показанными на рис. 2. Средние значения глубины прогорания от 13 до 15 см были характерны для всех участков, за исключением осинника с березой и сосной — 20 ± 9 см (табл. 1). Немного меньше средних были медианы значений прогорания — 11–15 и 19 см. Близость средних и медианных значений может свидетельствовать о симметричности распределения значений глубин прогорания торфа. При этом распределение глубин прогорания для участков с разным древостоем отличалось (рис. 5). Оно было близким для сосняка с березой и березняка с единичной сосной, для которых при средних (14 ± 5 и 15 ± 6) и медиане (13 и 14) максимальные значения не превышали 32 см. Диапазон глубин прогорания был шире для осинника с березой и сосной — 20 ± 9 и 19 см (среднее M и стандартное отклонение S , медиана M_e), осинника с березой и черной ольхой (13 ± 8 , 12) и березняка с черной ольхой (15 ± 8 , 15), где максимальные значения глубины прогорания торфа достигали 50 см и более. Особенно хорошо это видно для осинника с березой и ольхой (рис. 5), который характеризовался и максимальными средними значениями прогорания.

Полученные оценки близки к опубликованным ранее зарубежным и отечественным данным глубины прогорания почвы при торфяных пожарах для болот лесной зоны (Dyngness, Norum, 1983; Ефремова, Ефремов, 1994; Miyanishi, Johnson, 2002; Kasischke, Johnstone, 2005; Вомперский и др., 2007; Копотева, Купцова, 2016; и др.) и подтверждают отмечаемую большинством авторов неравномерность по площади прогорания торфяных почв.

Потери почвенного углерода

Послойные характеристики торфа, включая ботанический состав, степень разложения (R), зольность, объемный вес и содержание углерода были получены по 8 разрезам, приуроченным к пробным площадям, расположенным на гари и вне ее, на прилегающей, не затронутой пожаром

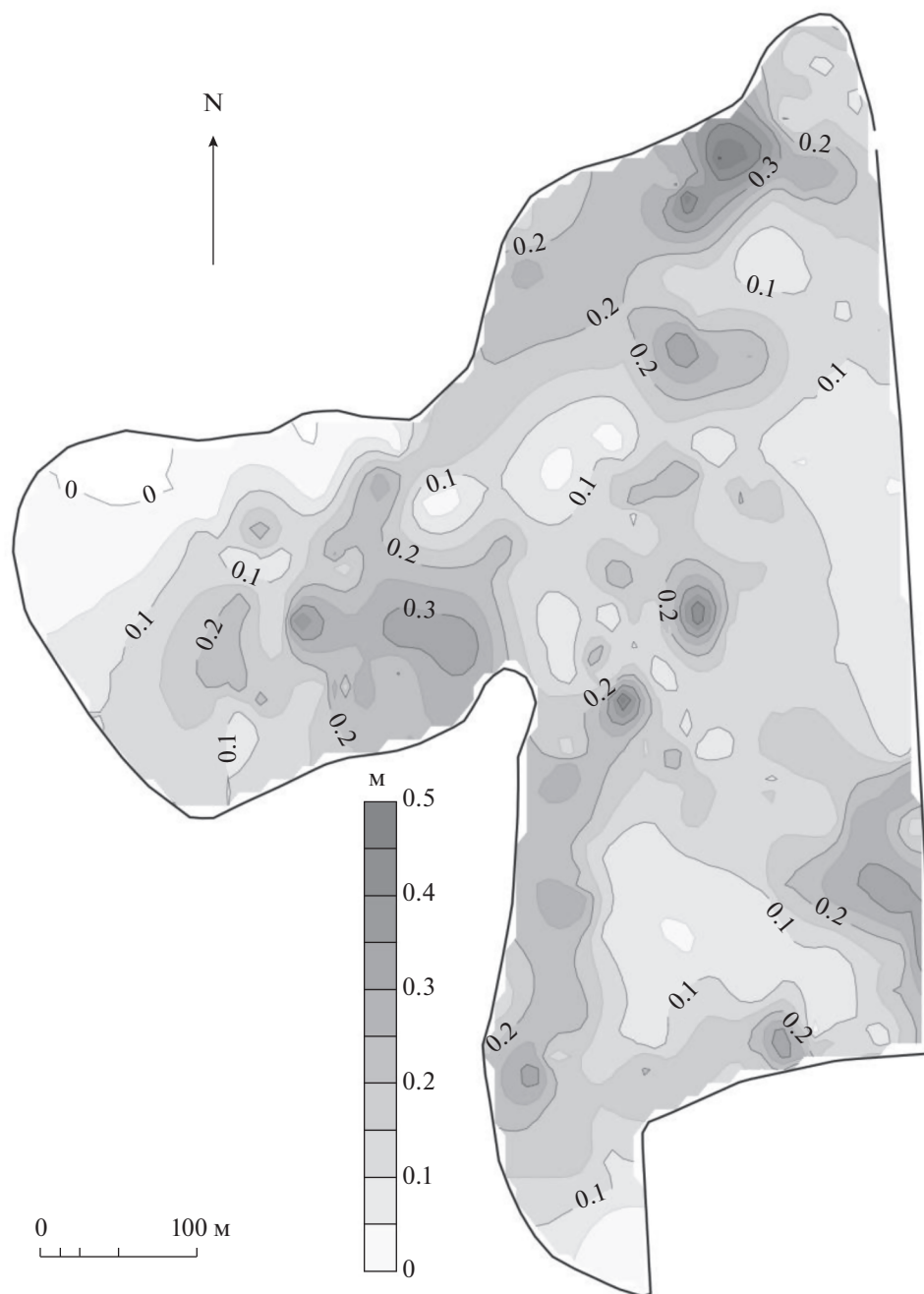


Рис. 3. Глубина прогорания торфа, м.

территории (табл. 2). На основании этих данных рассчитан запас углерода в каждом 5-сантиметровом горизонте торфа. Разрезы характеризуют различные, однако сравнимые по данным реконструкции допожарного древесного покрова (рис. 2), горелые и негорелые участки, а разрезы на пр. пл. 6 (вне гари) и 7 (гарь) расположены рядом по обе стороны границы распространения огня.

Для всех расположенных вне гари разрезов выявлена повышенная зольность верхних 5 см (пр. пл.), 10 см (пр. пл. 5) и 15 см (пр. пл. 1 и 2)

торфяной почвы — до 20% и более. Таким образом, она многократно превосходит зольность нижележащих горизонтов (табл. 2), значения которой не превышают 3–4%, характерных для верхних торфов. Повышенная зольность — результат ветрового разноса золы с гари.

По содержанию углерода в 5-сантиметровых слоях горизонтов всех разрезов (табл. 2) были получены значения запаса углерода нарастающим итогом с шагом 5 см и построена их зависимость от глубины (рис. 6). С учетом относительно не-

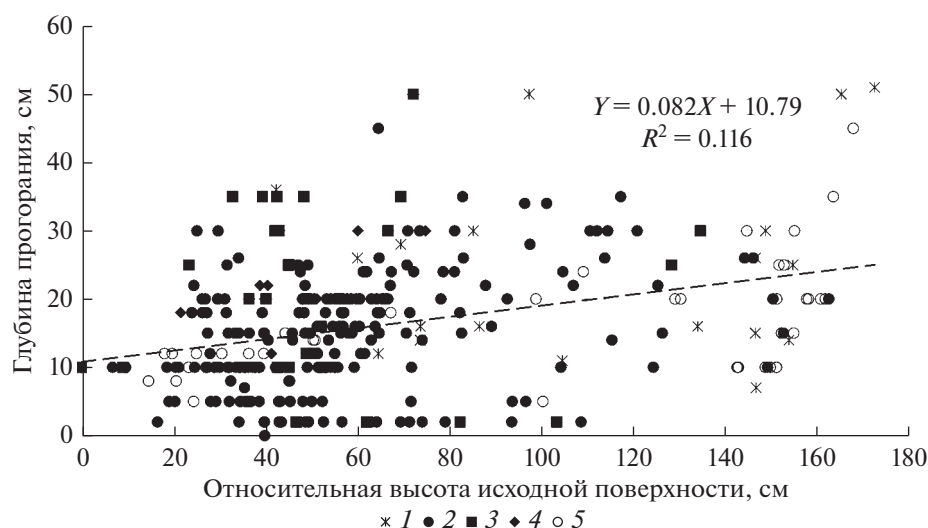


Рис. 4. Зависимость глубины прогорания от относительной высоты исходной поверхности почвы, восстановленной по корневой шейке пней деревьев разных пород, 1 – сосна; 2 – береза; 3 – осина; 4 – ольха черная; 5 – неопределенные.

большого разброса данных было решено ограничиться общей для всех разрезов зависимостью запаса углерода от глубины (рис. 6), которая была использована для расчета потерь углерода на основе данных глубины прогорания почвы (табл. 1).

Наибольшие значения потери углерода были получены для осинника с березой и сосной – 12.9 ± 6.18 (средняя) и 12.3 (медиана). Здесь, а также на участках осинника с черной ольхой и березняка с черной ольхой потери углерода достигали

локальных значений 30 кг м^{-2} и выше, в других случаях они обычно не превышали 20 кг м^{-2} . Наименьшие потери были характерны для черноольшаника – 8.61 ± 3.75 (средняя) и 7.39 (медиана). В остальных случаях они варьировали от 9.22 ± 3.75 (средняя) и 8.0 (медиана) до 11.0 ± 4.96 и 11.0 кг м^{-2} . Средняя потеря почвенного углерода для всей гары составила 9.8 ± 5.57 , а медиана 9.22 кг м^{-2} , что соответствует 98 и 92 т С га^{-1} .

Таблица 1. Глубина прогорания и потери углерода для условных классов древостоя

	Сосняк с березой	Березняк с единичной сосной	Осинник с березой и сосной	Осинник с березой и черной ольхой	Березняк с черной ольхой	Черная ольха	Нелесные	Гарь в целом
Площадь								
га	0.48	0.98	0.67	3.11	2.25	0.08	0.51	8.08
%	6.0	12.1	8.3	38.5	27.8	1.0	6.3	100
Глубина прогорания, см								
<i>M</i>	14	15	20	13	15	13	17	15
<i>S</i>	5	6	9	8	8	5	7	8
max	32	32	50	50	51	27	35	51
min	3	1	6	0	0	5	4	0
<i>M_e</i>	13	14	19	12	15	11	17	14
Потери углерода, кг м^{-2}								
<i>M</i>	9.22	9.8	12.9	8.61	9.8	8.61	11.0	9.8
<i>S</i>	3.75	4.35	6.18	5.57	5.57	3.75	4.96	5.57
max	20.2	20.2	31.1	31.1	31.7	17.1	22.0	31.7
min	2.53	1.31	4.35	0	0	3.75	3.14	0
<i>M_e</i>	8.61	9.22	12.3	8.0	9.8	7.39	11.0	9.22

Примечание: *M* – среднее арифметическое, *S* – стандартное отклонение, *M_e* – медиана.

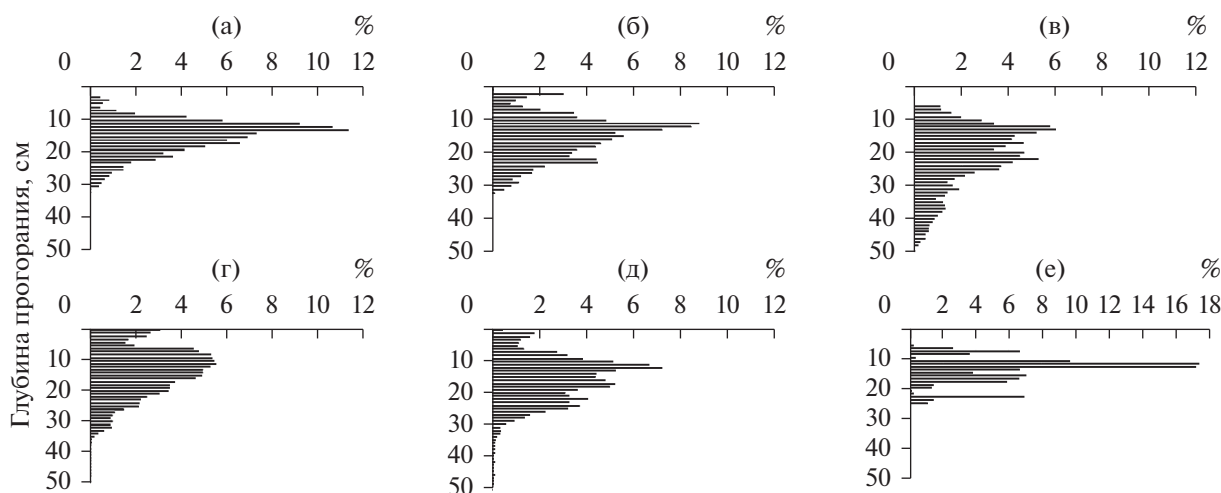


Рис. 5. Распределение глубин прогорания внутри выделенных условных классов древостоя, в % от площади класса. а – сосняк с березой; б – березняк с единичной сосной; в – осинник с березой и сосной; г – осинник с березой и черной ольхой; д – березняк с черной ольхой; е – черноольшаник.

Полученные данные находятся в верхней части диапазона значений потерь почвенного углерода при торфяных пожарах, представленных другими авторами, которые мало отличаются для Северной Америки – $15\text{--}25 \text{ т С га}^{-1}$ и для Северной Европы и Азии – $17\text{--}23 \text{ т С га}^{-1}$ (Benscoter, Wieder, 2003). Сравнение результатов полевых определений потерь почвенного углерода при торфяных пожарах в таежной (boreal) и умеренной (temperate) зонах показало, что при ограниченном числе их средние значения составляют $22\text{--}28 \text{ т С га}^{-1}$, хотя имеются и более скромные оценки – $11\text{--}15 \text{ т С га}^{-1}$ (Davies et al., 2013). В этот же диапазон попадают и наши данные, полученные ранее, – среднее $4.3\text{--}28.7$, медиана $22\text{--}29.7 \text{ т С га}^{-1}$ (Глухова, Сирин, 2018).

Однако на этом фоне результаты данного исследования не являются исключительными. Значения потерь углерода при торфяных пожарах в таежной и умеренной зонах, достигающие и даже превышающие 100 т С га^{-1} , были показаны и другими авторами (Poulter et al., 2006; Turetsky et al., 2011; Davies et al., 2013). Основная причина полученных нами высоких значений потерь почвенного углерода, видимо, связана с проведенным ранее частичным осушением участка. Установлено, что более низкий уровень почвенно-грунтовых вод, чему способствует осушение, увеличивает глубину прогорания торфяной почвы (Вомперский и др., 2007) и, соответственно, потерю почвенного углерода (Глухова, Сирин, 2018). Другая немаловажная причина – осушение, которое способствует усадке почвы, ее уплотнению и увеличению относительного содержания углерода на единицу слоя. Сравнение неосушенного и осушенного участков показало, что глубина прогора-

ния была 7 и 19 см, а потери углерода во втором случае были выше в 9 раз, достигнув 170 т С га^{-1} (Turetsky et al., 2011). Все это свидетельствует о том, что и глубина прогорания почвы, и величина потери углерода, определяющие поступление диоксида углерода в атмосферу, будут существенно выше в случае осушенных торфяных почв, являясь кроме того дополнительным фактором увеличения опасности их возгорания.

Полученные оценки потери почвенного углерода в целом для гари – 98 (средняя) и 92 (медиана) т С га^{-1} существенно превышают потенциальные потери углерода, связанные с утерей живой фитомассы. Даже после интенсивного пожара, переходящего в верховой, большая часть стволов деревьев сохраняется, нередко на корню. Однако в условиях торфяных почв даже несильные низовые пожары могут иметь губительные последствия

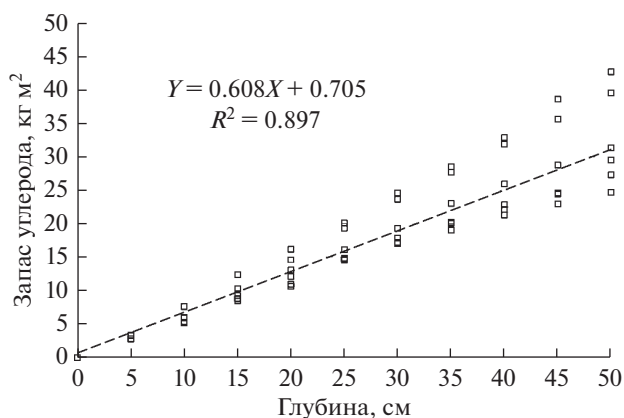


Рис. 6. Зависимость запаса почвенного углерода от мощности торфяного слоя.

Таблица 2. Характеристика торфа на пробных площадях

<i>H</i> , см	Вид торфа	<i>R</i> , %	<i>A</i> , %	<i>B</i> , г см ⁻³	<i>C</i> , %	<i>VC</i> , кг м ⁻³	Вид торфа	<i>R</i> , %	<i>A</i> , %	<i>B</i> , г см ⁻³	<i>C</i> , %	<i>VC</i> , кг м ⁻³
пр. пл. 1 (вне гари)							пр. пл. 8 (гарь)					
0–5	Древесный	—	21.8	0.17	50.9	3.33	×	×	×	×	×	×
5–10	Древесный	35	18.0	0.20	52.1	4.28	×	×	×	×	×	×
10–15	Древесный	30	10.4	0.19	54.9	4.75	—	—	55.8	0.13	30.8	0.88
15–20	Древ.-сф.	30	3.0	0.14	54.7	3.79	Пушиц.	—	23.5	0.39	38.2	5.69
20–25	Древ.-сф.	30–35	1.9	0.15	53.8	3.92	Пушиц.	30–35	4.1	0.31	55.1	8.19
25–30	Пушиц.	30	2.0	0.18	52.5	4.50	—	—	—	—	—	—
30–35	—	—	3.9	0.16	51.2	3.89	—	—	—	—	—	—
35–40	—	—	4.9	0.16	58.9	4.35	—	—	—	—	—	—
40–45	—	—	2.1	0.22	52.4	5.74	—	—	—	—	—	—
45–50	—	—	1.8	0.16	52.1	4.09	—	—	—	—	—	—
пр. пл. (вне гари)							пр. пл. (гарь)					
0–5	—	40–45	27	0.17	44.9	2.79	×	×	×	×	×	×
5–10	Древ.-сф.	40	17.8	0.17	45.6	3.18	Магеллан.	30	26	0.17	49.7	3.13
10–15	Древ.-сф.	35–40	14	0.19	52.8	4.32	Магеллан.	20	4.2	0.13	53.3	3.31
15–20	Древ.-сф.	30–35	2.2	0.16	55.1	4.31	Магеллан.	30	2.8	0.12	49.4	2.88
20–25	Сфагновый	30	2.5	0.18	53.7	4.71	—	—	2.7	0.11	51.2	2.73
25–30	Магеллан.	30	3.2	0.17	52.4	4.31	—	—	1.3	0.09	48.7	2.16
30–35	—	—	2.3	0.16	51.8	4.04	—	—	1.4	0.08	51.1	2.01
35–40	—	—	2.0	0.16	53.8	4.21	—	—	1.4	0.09	50.2	2.23
40–45	—	—	2.0	0.15	50.4	3.70	—	—	1.1	0.07	48.7	1.68
45–50	—	—	2.8	0.15	53.9	3.93	—	—	1.1	0.07	49.7	1.72
пр. пл. 6 (вне гари)							пр. пл. 7 (гарь)					
0–5	—	40–45	27.5	0.27	50.3	3.36	×	×	×	×	×	×
5–10	Сосн.-пуш.	40	5.4	0.2	34.3	5.28	×	×	×	×	×	×
10–15	Пушиц.	35	3.1	0.13	53.7	3.48	×	×	×	×	×	×
15–20	Магеллан.	35	2.2	0.16	55.8	4.31	—	—	1.9	0.13	34.5	2.20
20–25	Магеллан.	25	3.0	0.12	55.2	3.03	Пушиц.	35	4.1	0.15	50.1	3.61
25–30	Пушиц.	35	3.8	0.07	55.2	1.75	Пушиц.	25–30	41.1	0.35	25.5	2.63
30–35	—	—	4.0	0.08	51.9	2.33	—	—	1.6	0.11	52.9	2.86
35–40	—	—	2.2	0.1	51.9	2.62	—	—	2.0	0.08	52.1	2.04
40–45	—	—	2.2	0.07	60.8	1.75	—	—	1.5	0.09	52.5	2.32
45–50	—	—	1.8	0.1	53.7	2.72	—	—	1.7	0.21	49.1	5.07
пр. пл. 5 (вне гари)							пр. пл. 4 (гарь)					
0–5	Древесный	45	18.5	0.14	48.9	2.79	×	×	×	×	×	×
5–10	Сфагновый	40	16.7	0.12	49.5	2.37	×	×	×	×	×	×
10–15	Магеллан.	25	3.9	0.16	49.5	3.69	×	×	×	×	×	×
15–20	—	—	—	—	—	—	—	—	29.5	0.17	29.7	1.78
20–25	—	—	—	—	—	—	Пушиц.-сф.	20	10.6	0.18	50.4	4.06
25–30	—	—	—	—	—	—	Сосновый	40–45	3.5	0.17	57.0	4.59
30–35	—	—	—	—	—	—	—	—	3.7	0.15	58.4	3.72
35–40	—	—	—	—	—	—	—	—	2.8	0.12	51.4	2.91
40–45	—	—	—	—	—	—	—	—	2.0	0.12	49.8	2.82
45–50	—	—	—	—	—	—	—	—	2.2	0.1	48.0	2.54

Примечание. *H* — глубина горизонта, см; *R* — степень разложения, %; *A* — зольность, %; *B* — объемный вес, г см⁻³; *C* — содержание углерода в сухом торфе, %; *AC* — запас углерода в горизонте торфа, кг м⁻²; пр. пл. — пробные площади; торфа: др.-сфагн. — древесно-сфагновый, пушиц. — пушицевый, магеллан. — магелланикум, сосн.-пуш. — сосново-пушицевый, пушиц.-сф. — пушицево-сфагновый; × — выгоревший горизонт торфа; — нет данных.

для древостоя за счет заглубления огня и повреждения сосущих корней (Вомперский и др., 2007). Погибшие деревья в лучшем случае назначаются в рубку, в худшем остаются и постепенно разлагаются. В нашем случае запасы углерода фитомассы древесного яруса с запасом стволовой древесины более $280 \text{ м}^3 \text{ га}^{-1}$ (Маслов и др., 2017) составили в среднем для гари 60 т га^{-1} , что, как минимум, в 1.5 раз меньше полученных оценок потери почвенного углерода. Потерю углерода при сгорании фитомассы напочвенного яруса и возможного развитого местами подлеска мы не учитывали, однако ее значения не могли существенно повлиять на общую картину соотношения потерь.

Потери почвенного углерода в случае рассматриваемого подземного (торфяного) пожара могли привести к единовременному выбросу в атмосферу почти $400 \text{ т CO}_2 \text{ га}^{-1}$. При аналогичной потере торфа на единицу площади в 96 т С га^{-1} отмечается, что пожар площадью 4.1 га мог составить $0.1\text{--}0.3\%$ диоксида углерода, поглощаемого всеми болотами Великобритании (Davies et al., 2013). Даже без учета сгорания напочвенного покрова и части фитомассы древостоя при пожаре, а также последующего разложения и/или утилизации древесины только потери почвенного углерода являются весьма значительным фактором поступления диоксида углерода в атмосферу. Для сравнения потери углерода при интенсивной фрезерной добыче торфа составили $25\text{--}32 \text{ т С га}^{-1} \text{ год}^{-1}$, путем эмиссии CO_2 при деградации открытого торфа на заброшенных полях торфодобычи — $1.6\text{--}4.7$, с неиспользуемых сенокосов — $0.8 \text{ т С га}^{-1} \text{ год}^{-1}$ (Суворов и др., 2015). Если исходить из приведенной здесь же, полученной по данным ^{14}C -датирования и запасу углерода в торфе долговременной кажущейся скорости накопления C (long-term apparent rate of carbon accumulation — LORCA) — $14\text{--}17 \text{ г С м}^{-2} \text{ год}^{-1}$, рассматриваемый пожар привел к потере углерода, накопленного в залежи за $600\text{--}700$ лет.

Заключение. Подземные (торфяные) пожары отличаются сложностью оценки потерь почвенного углерода. Изучение гари лесоторфяного пожара 2010 г. в Московской области площадью 8 га с различным составом исходного древостоя подтвердило возможность определения глубины прогорания и потери почвенного углерода путем восстановления допожарной поверхности почвы по корневой шейке пней и сравнения характеристик торфа на сгоревших и прилегающих к гари площадях.

Средняя (медиана) глубины прогорания составила 15 ± 8 (14) см при варьировании на разных участках от 13 ± 5 (11) до 20 ± 9 (19) см. Глубина прогорания возрастала с относительной высотой поверхности и была максимальной на участках с преобладанием осины. Полученные оценки близ-

ки к опубликованным ранее зарубежным и отечественным данным для торфяных пожаров в лесной зоне и подтверждают отмечаемую большинством авторов неравномерность по площади прогорания торфяных почв. Максимальные значения глубины прогорания торфа достигали 50 см и более. Выявлена тенденция увеличения прогорания торфа с увеличением относительной высоты восстановленной (исходной до пожара) поверхности почвы, вероятно, по причине лучшей дренированности таких участков.

По данным послойного определения объемного веса, зольности и содержания углерода в торфе получены зависимости потерь углерода от глубины прогорания почвы, которая составила для гари в среднем (медиана) 9.8 ± 5.57 (9.22) кг м^{-2} при варьировании на разных участках от 8.61 ± 3.75 (7.39) до 12.9 ± 6.18 (12.3) кг м^{-2} . Полученные данные находятся в верхней части диапазона значений потерь почвенного углерода при торфяных пожарах в таежной (boreal) и умеренной (temperate) зонах, представленных зарубежными и отечественными исследованиями: значения, превышающие 100 т С га^{-1} , были показаны и другими авторами. Полученные высокие значения связаны с частичным осушением участка, которое способствовало более глубокому прогоранию и, за счет уплотнения почвы, большей потере углерода на единицу глубины.

Потери почвенного углерода в случае рассматриваемого подземного (торфяного) пожара могли привести к единовременному выбросу в атмосферу почти $400 \text{ т CO}_2 \text{ га}^{-1}$, что, как минимум, в 1.5 раза выше возможного поступления CO_2 в атмосферу от потери углерода биомассы произраставшего здесь древостоя с запасом стволовой древесины более $280 \text{ м}^3 \text{ га}^{-1}$. Результаты подтверждают недооцененность фактора подземных (торфяных) пожаров в бореальной зоне по сравнению с тропиками и в целом при рассмотрении влияния лесных и болотных экосистем на газовый состав атмосферы и климат.

Авторы благодарят за помощь в поиске и выборе объекта исследований С. Абель (Susanne Abel) и А. Хаберла (Andreas Haberl) из Грайсфальдского болотного центра (Greifswald Mire Center), Ю.А. Гопиуса и А.В. Маркину (ИЛАН РАН) за помощь в полевых исследованиях, О.Н. Успенскую (ФГБНУ ФНЦО/ ИЛАН РАН) за определение ботанического состава и степени разложения торфа, Г.Г. Суворова (ИЛАН РАН) за определение элементного состава торфа, Т.В. Глухову и М.М. Журавкову (ИЛАН РАН) за комментарии по рукописи статьи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Вомперский С.Э., Глухова Т.В., Смагина М.В., Ковалев А.Г. Условия и последствия пожаров в сосняках на осушенных болотах // Лесоведение. 2007. № 6. С. 35–44.
- Вомперский С.Э., Сири́н А.А., Сальников А.А., Цыганова О.П., Валяева Н.А. Оценка площади болотных и заболоченных лесов России // Лесоведение. 2011. № 5. С. 3–11.
- Глухова Т.В., Сири́н А.А. Потери почвенного углерода при пожаре на осушенном лесном верховом болоте // Почвоведение. 2018. № 5. С. 580–588.
- Ефремова Т.Т., Ефремов С.П. Торфяные пожары как экологический фактор развития лесоболотных экосистем // Экология. 1994. № 5. С. 27–34.
- Исаев А.С., Коровин Г.Н., Сухих В.И., Титов С.П., Уткин А.И., Голуб А.А., Замолотчиков Д.Г., Пряжников А.А. Экологические проблемы поглощения углекислого газа посредством лесовосстановления и лесоразведения в России (аналитический обзор). М.: Центр экологической политики России, 1995. 156 с.
- Копотева Т.А., Купцова В.А. Влияние пожаров на функционирование фитоценозов торфяных болот Среднеамурской низменности // Экология. 2016. № 1. С. 14–21.
- Маслов А.А., Гульбе Я.И., Макаров Д.А., Сири́н А.А. Восстановление допозарных характеристик лесных насаждений на гари по данным космической съемки и полевых наблюдений [Электронный ресурс] // Лесохозяйственная информация: электронный сетевой журнал. 2017. № 4. С. 73–84. URL: <http://lhi.vniilm.ru/>
- Минаева Т.Ю., Сири́н А.А. Торфяные пожары – причины и пути предотвращения // Наука и промышленность. 2002. № 9. С. 3–8.
- Минаева Т.Ю., Сири́н А.А. Биологическое разнообразие болот и изменение климата // Успехи современной биологии. 2011. Т. 131. № 4. С. 393–406.
- О состоянии природных ресурсов и окружающей среды Московской области в 2015 году / Под ред. Когана А.Б. Красногорск: ИП Алексахин А.А., 2016. 206 с.
- Сири́н А., Минаева Т., Возбранная А., Барталев С. Как избежать торфяных пожаров? // Наука в России. 2011. № 2. С. 13–21.
- Сири́н А.А., Маслов А.А., Валяева Н.А., Цыганова О.П., Глухова Т.В. Картографирование торфяных болот Московской области по данным космической съемки высокого разрешения // Лесоведение. 2014. № 5. С. 65–71.
- Суворов Г.Г., Чистотин М.В., Сири́н А.А. Потери углерода при добыче торфа и сельскохозяйственном использовании осушенного торфяника в Московской области // Агрохимия. 2015. № 11. С. 51–62.
- Уткин А.И., Замолотчиков Д.Г., Честных О.В., Коровин Г.Н., Зукерт Н.В. Леса России как резервуар органического углерода биосферы // Лесоведение. 2001. № 5. С. 8–23.
- Assessment on peatlands, biodiversity and climate change: main report / Eds. Parish F., Sirin A., Charman D., Joosten H., Minayeva T., Silvius M., Stringer L. Kuala Lumpur: Global Environment Centre, and Wageningen: Wetlands International, 2008. 118 p.
- Benscoter B.W., Wieder R.K. Variability in organic matter lost by combustion in a boreal bog during the 2001 Chisholm fire // Canadian Journal of Forest Research. 2003. V. 33. P. 2509–2513.
- 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. V. 308. P. 169–177.
<https://doi.org/10.1016/j.foreco.2013.07.051>
- Dyrness C.T., Norum R.A. The effects of experimental fires on black spruce forest floors in interior Alaska // Canadian Journal of Forest Research. 1983. V. 13. P. 879–893.
- Flannigan M., Stocks B., Turetsky M., Wotton M. Impacts of climate change on fire activity and fire management in the circumboreal forest // Global Change Biology. 2009. V. 15. P. 549–560.
- Hu Y., Fernandez-Anez N., Smith T.E.L., Rein G. Review of emissions from smouldering peat fires and their contribution to regional haze episodes // International Journal of Wildland Fire. 2018. V. 27. P. 293–312.
<https://doi.org/10.1071/WF17084>
- Huang X., Rein G. Downward spread of smouldering peat fire: the role of moisture, density and oxygen supply // International Journal of Wildland Fire. 2017. V. 26. P. 907–918.
<https://doi.org/10.1071/WF16198>
- IPBES (2018): The IPBES regional assessment report on biodiversity and ecosystem services for Europe and Central Asia. Eds. Rounsevell M., Fischer M., Torre-Marín Rando A., Mader A. (eds.). Secretariat of the Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services, Bonn, Germany, 2018. 892 p.
- IPCC 2014, 2013 Supplement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories: Wetlands / Eds. Hiraishi T., Krug T., Tanabe K., Srivastava N., Baasansuren J., Fukuda M., Troxler T.G. Published: IPCC, Switzerland.
- Joosten H., Sirin A., Couwenberg J., Laine J., Smith P. The role of peatlands in climate regulation // Peatland restoration and ecosystem services: science, policy and practice. Eds. Bonn A., Allott T., Evans M., Joosten H., Stoneman R. Cambridge: Cambridge University Press, 2016. P. 66–79.
<https://doi.org/10.1017/CBO9781139177788>
- Kasischke E.S., Johnstone J.F. Variation in post-fire organic layer thickness in a black spruce forest complex in Interior Alaska and its effects on soil temperature and moisture // Canadian Journal of Forest Research. 2005. V. 35. P. 2164–2177.
- Minayeva T., Sirin A.A., Stracher G.B. The peat fires of Russia // Coal and peat fires: A global perspective / Eds. Stracher G.B., Prakash A., Sokol E.V. Amsterdam: Elsevier, 2013. P. 376–394.
- Miyanishi K., Johnson E.A. Process and patterns of duff consumption in the mixwood boreal forest // Canadian J. Forest Research. 2002. V. 32. P. 1285–1295.
- 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. Geophysical Research. 2006. V. 111. D06301.
<https://doi.org/10.1029/2005JD006455>
- Reddy A.D., Hawbaker T.J., Wurster F., Zhu Z., Ward D.S., Newcomb D., Murray R. Quantifying soil carbon loss and uncertainty from a peatland wildfire using multi-temporal

LiDAR // Remote Sensing of Environment. 2015. V. 170. P. 306–316.
<https://doi.org/10.1016/j.rse.2015.09.017>
 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. V. 8(1). P. 11–14.
<https://doi.org/10.1038/NGEO2325>

Turetsky M.R., Donahue W.F., Benscoter B.W. Experimental drying intensifies burning and carbon losses in a northern peatland // Nature Communications. 2011. № 2. P. 514.

Turetsky M.R., Wieder R.K. A direct approach to quantifying organic matter lost as a result of peatland wildfire // Canadian Journal of Forest Research. 2001. V. 31. P. 363–366.

Depth of Peat Burning and Carbon Losses from an Underground Forest Fire

A. A. Sirin^{1,*}, D. A. Makarov¹, I. Gummert², A. A. Maslov¹, and Ya. I. Gul'be¹

¹Institute of Forest Science, Russian Academy of Sciences, Sovetskaya st. 21, Uspenskoe, Moscow region, 143030 Russia

²University of Greifswald, Soldmannstrasse 15, D-17487 Greifswald, Germany

*E-mail: sirin@ilan.ras.ru

Received 13 February 2019

Revised 29 April 2019

Accepted 5 June 2019

The underground (peat) fires lead among forest fires by the volumes of material burned per unit area and, accordingly, put the greatest impact on climate change. However, soil carbon losses and emissions to the atmosphere are especially difficult to assess for these fires. The depth of peat burning out and soil carbon losses for an 9-hectare site with a variable original tree stand composition, that was burned in a 2010 forest fire in Moscow Oblast, were determined by means of restoration of the pre-fire soil surface using root necks of stumps and peat characteristics in the burned and adjacent intact areas. The median depth of burning out was 15 ± 8 (14) cm, with local variations from 13 ± 5 (11) to 20 ± 9 (19) cm. The depth of burning out has grown with an increase of relative height and reached maximum on aspen-dominated locations. Using the data on layer-by-layer bulk density, ash content, and carbon content in peat, we calculated the dependence of the carbon volume on the depth of peat, and using it and the burning out depth we estimated the fire-related carbon losses. The median carbon loss was 9.8 ± 5.57 (9.22) kg m^{-2} with local variations from 8.61 ± 3.75 (7.39) to 12.9 ± 6.18 (12.3) kg m^{-2} . This equals to a one-time emission of $400 \text{ t CO}_2 \text{ ha}^{-1}$ and is at least 1.5 times greater than possible CO_2 emissions from the biomass losses from the original forest stand with a timber yield of over $280 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$. The results correspond to the upper level of soil carbon losses assessed by foreign authors and support the idea that the contribution of underground (peat) fires has been underestimated in the boreal zone as compared with the tropics and, generally, within the problem of forest and peatland influence on atmospheric gas composition and climate.

Key words: forest fires, underground fires, peat fires, peatlands, peat, carbon, climate change, greenhouse gases, carbon dioxide.

Acknowledgements: Study was supported by the project ‘‘Restoring peatlands in Russia – for fire prevention and climate change mitigation’’ financed under the International Climate Initiative (IKI) by the German Federal Ministry for the Environment, Nature Conservation and Nuclear Safety (BMUB), facilitated through the KfW (project no. 11 III 040 RUS K Restoring Peatlands) and partially supported by the Russian Foundation for Basic Research, project No. 16–05–00762.

REFERENCES

- Benscoter B.W., Wieder R.K., Variability in organic matter lost by combustion in a boreal bog during the 2001 Chisholm fire, *Canadian Journal of Forest Research*, 2003, Vol. 33, No. 12, pp. 2509–2513.
- 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.
- Dyrness C., Norum R.A., The effects of experimental fires on black spruce forest floors in interior Alaska, *Canadian Journal of Forest Research*, 1983, Vol. 13, No. 5, pp. 879–893.
- Efremova T.T., Efremov S.P., Torfyanye pozhary kak ekologicheskii faktor razvitiya lesobolotnykh ekosistem (Peat fires as an environmental factor of development of boggy forest ecosystems), *Ekologiya*, 1994, No. 5–6, pp. 27–34.
- Flannigan M., Stocks B., Turetsky M., Wotton M., Impacts of climate change on fire activity and fire management in the circumboreal forest, *Global Change Biology*, 2009, Vol. 15, No. 3, pp. 549–560.
- Glukhova T., Sirin A., Losses of soil carbon upon a fire on a drained forested raised bog, *Eurasian Soil Science*, 2018, Vol. 51, No. 5, pp. 542–549.
- IPCC 2014, 2013 Supplement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories: Wetlands / Eds. Hiraishi T., Krug T., Tanabe K., Srivastava N., Baasansuren J., Fukuda M., Troxler T.G. Published: IPCC, Switzerland.

- <http://mep.mosreg.ru/dokumenty/informaciya-i-statistika/analiticheskie-doklady-i-obzory/13-05-2016-11-48-22-informatsionnyy-vypusk-o-sostoyanii-prirodnikh-res>, (30 May 2019).
- Hu Y., Fernandez-Anez N., Smith T.E., Rein G., Review of emissions from smouldering peat fires and their contribution to regional haze episodes, *International Journal of Wildland Fire*, 2018, Vol. 27, No. 5, pp. 293–312.
- Huang X., Rein G., Downward spread of smouldering peat fire: the role of moisture, density and oxygen supply, *International Journal of Wildland Fire*, 2017, Vol. 26, No. 11, pp. 907–918.
- Isaev A.S., Korovin G.N., Sukhikh V.I., Titov S.P., Utkin A.I., Golub A.A., Zamolodchikov D.G., Pryazhnikov A.A., *Ekologicheskie problemy pogloshcheniya uglekislogo gaza posredstvom lesovosstanovleniya i lesorazvedeniya v Rossii* (Environmental challenges of carbon dioxide absorption following reforestation and afforestation in Russia), Moscow: Tsentr ekologicheskoi politiki, 1995, 155 p.
- Isaev A.S., Utkin A.I., Zamolodchikov D.G., Chestnykh O.V., Zukert N.V., Lesa Rossii kak rezervuar organicheskogo ugleroda biosfery (Forests of Russia – a storage of carbon in biosphere), *Lesovedenie*, 2001, No. 5, pp. 8–23.
- Joosten H., Sirin A., Couwenberg J., Laine J., Smith P., The role of peatlands in climate regulation, In: *Peatland restoration and ecosystem services: Science, policy and practice* Cambridge: Cambridge University Press, 2016, pp. 63–76 (516 p.).
- Kasischke E.S., Johnstone J.F., Variation in postfire organic layer thickness in a black spruce forest complex in interior Alaska and its effects on soil temperature and moisture, *Canadian Journal of Forest Research*, 2005, Vol. 35, No. 9, pp. 2164–2177.
- Kopoteva T., Kuptsova V., Effect of fires on the functioning of phytocenoses of peat bogs in the Middle-Amur lowland, *Russian Journal of Ecology*, 2016, Vol. 47, No. 1, pp. 11–18.
- Maslov A.A., Gulbe Y.I., Makarov D.A., Sirin A.A., Vostanovlenie dopozharnykh kharakteristik lesnykh nasazhdenii na gari po dannym kosmicheskoi s"emki i polevykh nablyudenii (Evaluation of pre-fire forest stands condition on burned area using space imagery and on-ground investigations), *Lesokhozyaistvennaya informatsiya*, 2017, No. 4, pp. 73–84.
- Minayeva T.Y., Sirin A., Peatland biodiversity and climate change, *Biology Bulletin Reviews*, 2012, Vol. 2, No. 2, pp. 164–175.
- Minayeva T.Y., Sirin A.A., Stracher G.B., The peat fires of Russia, In: *Coal and peat fires: a Global perspective* Amsterdam: Elsevier B.V., 2013, pp. 376–394 (554 p.).
- Miyaniishi K., Johnson E., Process and patterns of duff consumption in the mixedwood boreal forest, *Canadian Journal of Forest Research*, 2002, Vol. 32, No. 7, pp. 1285–1295.
- Parish F., Sirin A., Charman D., Joosten H., Minayeva T., Silvius M., Stringer L., *Assessment on peatlands, biodiversity and climate change: main report* Kuala Lumpur, Wageningen: Global Environment Centre, Wetlands International, 2008, 179 p.
- Poulter B., Christensen Jr N.L., Halpin P.N., Carbon emissions from a temperate peat fire and its relevance to interannual variability of trace atmospheric greenhouse gases, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2006, Vol. 111, No. D6, doi 10.1029/2005JD006455.
- 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 of Geophysical Research: Atmospheres*, 2006, Vol. 111, No. D6.
- Reddy A.D., Hawbaker T.J., Wurster F., Zhu Z., Ward S., Newcomb D., Murray R., Quantifying soil carbon loss and uncertainty from a peatland wildfire using multi-temporal LiDAR, *Remote Sensing of Environment*, 2015, Vol. 170, pp. 306–316.
- Rounsevell M., Fischer M., Torre-Marín Rando A., Mader A., *The IPBES regional assessment report on biodiversity and ecosystem services for Europe and Central Asia* Bonn: Secretariat of IPBES, 2018, 892 p.
- Sirin A., Maslov A., Valyaeva N., Tsyganova O., Glukhova T., Mapping of peatlands in the Moscow oblast based on high-resolution remote sensing data, *Contemporary Problems of Ecology*, 2014, Vol. 7, No. 7, pp. 808–814.
- Sirin A., Minaeva T., Vozbrannaya A., Bartalev S., How to avoid peat fires?, *Science in Russia*, 2011, No. 2, pp. 13–21.
- Suvorov G.G., Chistotin M.V., Sirin A.A., Poteri ugleroda pri dobyche torfa i sel'skokhozyaistvennom ispol'zovanii osushennogo torfyanika v Moskovskoi oblasti (The carbon losses from a drained peatland in Moscow oblast used for peat extraction and agriculture), *Agrokhimiya*, 2015, No. 11, pp. 51–62.
- Turetsky M., Donahue W., Benscoter B., Experimental drying intensifies burning and carbon losses in a northern peatland, *Nature Communications*, 2011, Vol. 2, pp. 514.
- Turetsky M., Wieder R., A direct approach to quantifying organic matter lost as a result of peatland wildfire, *Canadian Journal of Forest Research*, 2001, Vol. 31, No. 2, pp. 363–366.
- 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, No. 1, pp. 11.
- Vomperskii S.E., Glukhova T.V., Smagina M.V., Kovalev A.G., Usloviya i posledstviya pozharov v sosnyakh na osushennykh bolotakh (The conditions and consequences of fires in pine forests on drained bogs), *Lesovedenie*, 2007, No. 6, pp. 35–44.
- Vompersky S., Sirin A., Sal'nikov A., Tsyganova O., Valyaeva N., Estimation of forest cover extent over peatlands and paludified shallow-peat lands in Russia, *Contemporary Problems of Ecology*, 2011, Vol. 4, No. 7, pp. 734–741.