

ПОТЕРИ ПОЧВЕННОГО УГЛЕРОДА ПРИ ПОЖАРЕ НА ОСУШЕННОМ ЛЕСНОМ ВЕРХОВОМ БОЛОТЕ

© 2018 г. Т. В. Глухова*, А. А. Сири

*Институт лесоведения РАН,
Россия, 143030, Московская обл., с. Успенское, Одинцовский р-н*

**e-mail: glutam@mail.ru, sirin@ilan.ras.ru*

Поступила в редакцию 23.01.2017 г.

Изучены последствия пожара (на площади 29 га) на лесном верховом болоте в Тверской обл., осушенном сетью открытых каналов глубиной 1 м при расстоянии между ними от 60 до 160 м. Уровни почвенно-грунтовых вод (УПГВ) варьируют на разных участках болота. Использован метод оценки потерь почвенного углерода (С), основанный на разнице концентраций золы между сгоревшим торфом в верхних и нижележащих несгоревших слоях. Потери С были больше вблизи осушительных каналов, чем на удаленных участках. Выборочные медианные значения потерь в кг С/м² составили 0.37 вблизи осушительных каналов и 0.22 на удаленных участках при расстоянии между каналами 160 м; 2.23 вблизи осушительных каналов и 0.79 на удаленных участках при расстоянии 106 м; от 1.13 до 2.10 вблизи осушительных каналов и 0.45 на удаленных участках при расстоянии между каналами 60 м. Максимальные потери С были в краевой части болота с УПГВ до 70 см, где выборочное медианное значение составляло 2.97 кгС/м². Полученные результаты потерь С при пожарах на верховых болотах хорошо согласуются с оценками других авторов (1.45–4.90 кгС/м²) и подтверждают важность учета таких потерь торфяными почвами (Histosols).

Ключевые слова: торфяные почвы (Histosols), пожары, изменение климата, уровень почвенно-грунтовых вод

DOI: 10.7868/S0032180X18050076

ВВЕДЕНИЕ

Торфяные почвы болот (Histosols [35]) с мощностью торфяного слоя > 30 см и торфянистые почвы (Histic soils [35]) заболоченных мелкоотрфованных земель (< 30 см) играют ключевую роль в круговороте углерода. Занимая 3% суши, торфяные болота содержат около 30% почвенного углерода планеты, что примерно равно его количеству в атмосфере или биомассе суши, в 2 раза больше чем в лесах. Болота – второй по значению (после океанических осадков) резервуар долговременного связывания атмосферного углерода – на протяжении всего постледникового периода играют важную роль в регулировании газового состава атмосферы и климата [22].

Одним из наиболее значительных факторов потерь углерода торфяными и торфянистыми почвами являются пожары [22]. Торфяные пожары 1997–1998 гг. в юго-восточной Азии привели к эмиссии диоксида углерода, соизмеримой с 15% мировых выбросов от сжигания ископаемого топлива, и привлекли внимание к их возможным последствиям для климата планеты. Эти последствия могут дополнительно усиливаться за счет поступления сажи (так называемого “черного

углерода”) и других специфических продуктов горения торфа [31]. Связанные с последствиями осушения болот пожары имеют глобальное значение: оценка долгосрочного среднего уровня эмиссий превышает 0.5 Гт СО₂ в год [25].

Торфяные пожары бывают практически во всех природных зонах, где встречаются болота. Это видно на примере нашей страны [27]. Для многих болот торфяные пожары – фактор их естественной динамики [8, 22, 30, 36], что подтверждают угли и другие свидетельства в торфяных залежах [28]. Возможность пожаров зависит в первую очередь от влажности торфа, которая может уменьшаться как по климатическим причинам, так и в результате деятельности человека [31]. В экстремально сухие годы горят даже обычно сильно обводненные верховые болота; огонь обходит только мочажины и озера [14, 27]. Воздействие человека значительно увеличивает частоту, интенсивность и масштабы торфяных пожаров, хотя масштабные пожары 2010 г. и других лет были обусловлены не осушением болот, а последующим прекращением их использования и контроля над ними [17]. Наложение климатического и антропогенного факторов усиливает опасность торфяных пожаров [10],

вероятность которых будет расти с изменением климата [13, 17]. На международном [22] и национальном [4, 9] уровнях пожары отмечены среди наибольших угроз для болот при изменении климата.

Предотвращение торфяных пожаров, особенно на осушенных и освоенных объектах, может рассматриваться в ряду мер по сокращению антропогенных выбросов парниковых газов и смягчению изменения климата [24]. Однако учет этих выбросов, включая сокращение их величины, например, при обводнении и восстановлении болот [24, 25, 34], ограничен сложностью определения потерь углерода при торфяных пожарах и недостаточностью данных. Крайне мало таких оценок для нетропических болот за рубежом [23, 26, 29, 32, 33, 36], еще меньше отечественных работ о влиянии пожаров на торфяные почвы [7, 12], что определяет их актуальность.

Торфяные и торфянистые почвы занимают в совокупности более 1/5 территории России [3]. Согласно геоинформационной системе “Болотные экосистемы России” Института лесоведения РАН, они приурочены к различным типам болот и заболоченных земель [6], в разной степени покрытых древесной растительностью [5]. Наиболее характерной группой типов болотных экосистем лесной зоны являются верховые (олиготрофные) болота, которые в большей части представлены лесными и редколесными сосново-кустарничково-сфагновыми биогеоценозами (например, “рямы” в Западной Сибири). Они же занимают значительные площади заболоченных мелкоотрфованных лесов и редколесий, отделяемых от собственно болот мощностью торфа менее 30 см, с которыми они, однако, обычно сопряжены и трудно разделимы в реальном пространстве. Для торфяных почв верховых болот характерна незначительная степень разложения растительных остатков, небольшая плотность и значительная пористость. При определенном падении УПГВ происходит прекращение капиллярного подъема влаги и резко сокращается испарение [16]. Это один из механизмов защиты верховых болот, получающих влагу только из атмосферы, от значительного высыхания. Одновременно возрастает пожароопасность верхнего слоя почвы, что объясняет повышенную горимость именно верховых болот. Болотные и заболоченные сосняки кустарничково-сфагновые были наиболее частым объектом осушительной гидроресомелиорации; только на европейской территории России она проведена на площади более 3 млн га [19, 21].

Лесоосушение – наиболее щадящий вариант осушения торфяных почв: оно не предполагает одновременного уничтожения или изменения растительного покрова (исключением являются трассы каналов), а по причине использования только одностороннего дренажа и во избежание переосушки в сухие периоды изначально планируется заниженная норма осушения. Поэтому в центре между дренами (в России традиционно применялись большие расстояния и глубины осушительных каналов) сохраняется близкий к исходному водный режим торфяных почв. С учетом снижения УПГВ при приближении к каналам создаются условия для оценки его влияния на потери углерода при пожаре.

Цель работы – оценка потерь почвенного углерода при торфяном пожаре на осушенном олиготрофном болоте с учетом степени дренированности, то есть различных расстояний между осушительными каналами. Данные получены в ходе комплексного изучения последствий низового пожара на объекте экспериментальной лесосоосушительной мелиорации на Западновинском лесоболотном стационаре Института лесоведения РАН.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Изучались последствия пожара 1999 г. на облесенном выпуклом верховом болоте центрально-олиготрофного хода развития Усвятский Мох (объект “Сосвятское”) с максимальной глубиной торфяной залежи более 5 м, осушенном сетью открытых каналов с различным расстоянием между ними. Массив залегает на зандровых песках и до осушения характеризовался отсутствием сильно обводненных окраев, свойственных массивам моренного залегания; в данном случае имел место плавный переход к соснякам на минеральных почвах.

Пожар затронул площадь 29 га на южном облесенном склоне массива, частично переходя на его краевую часть. Причина пожара – небрежное обращение с огнем сборщиков ягод. До пожара здесь произрастали разновозрастные (40–130 лет) сосняки кустарничково-сфагновые III–IV классов текущего бонитета. В кустарничковом ярусе были представлены голубика (*Vaccinium uliginosum* L.), багульник (*Ledum palustre* L.), болотный мирт (*Chamaedaphne calyculata* Moench.), брусника (*Vaccinium vitis idaea* L.), подбел (*Andromeda polifolia* L.), клюква (*Oxycoccus quadripetalus* L.) и др.; в травяно-моховом покрове: пушица влагалищная (*Eriophorum vaginatum* L.), сфагновые мхи (*Sphagnum angustifolium* (Russ.) C. Jens., *S. magellanicum* Brid., *S. fuscum* (Schimp.) Klinggr. и др.).

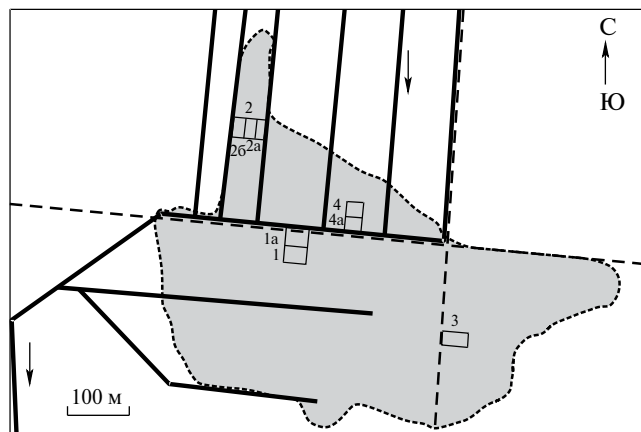


Рис. 1. Расположение пробных площадей на верховом болоте, пройденном торфяным пожаром (выделено серым цветом). Сплошные линии – дренажные каналы, пунктирные – квартальные просеки.

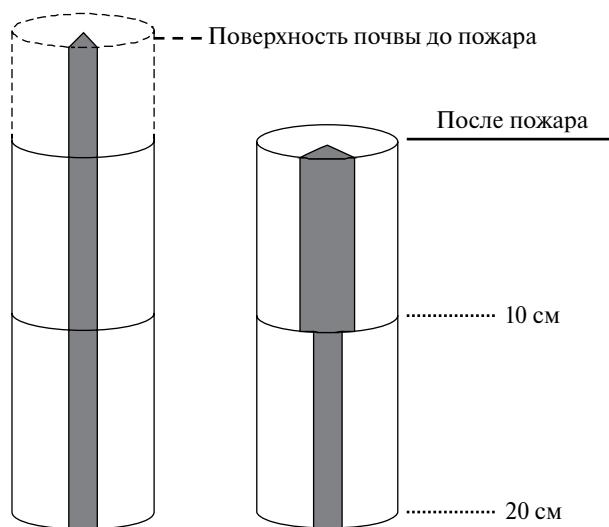


Рис. 2. Трансформация верхнего (0–10 см) слоя торфяной почвы после пожара.

Ко времени пожара осушительная сеть, проложенная в 1971–1973 гг., была представлена каналами глубиной 1 м с расстоянием между ними от 60 до 160 м. На гари через год после пожара были заложены 4 пробные площади от 0.15 до 0.24 га [2] в местах разной интенсивности пожара и степени дренированности (рис. 1), с выделением секций по разной удаленности от осушительных каналов. Мощность торфа в склоновой части массива (пробные площади 1, 2 и 4) составляла 3 м, в краевой части (пробная площадь 3) – менее 1 м. *Пробная площадь 1* была заложена на междренном пространстве при расстоянии между каналами 160 м. При пожаре здесь погибли все деревья

от теплового удара, высота нагара на стволах составляла 2.5 м от поверхности почвы, огонь часто доставал нижние ветви с хвоей. Корни деревьев и моховой покров пострадали в меньшей степени, огонь прошел по кустарничкам, поразив камбийный слой стволов. Площадь была поделена на две секции: приканальную, примыкающую к магистральному каналу со стороны кавальера (1а), и центральную – между магистральным и осушительными каналами (1). *Пробная площадь 2* расположена на междренном пространстве шириной 60 м. Здесь древостой в равной мере пострадал (погибло более 90% деревьев) от теплового удара и от повреждения корней. Происходили сильные вывалы в приканальных полосах. Были выделены три секции: 2а и 2б – приканальные зоны и 2 – середина. *Пробная площадь 3* располагается на окрайке болота с более развитым древостоем. Здесь пожаром были сильно повреждены корни деревьев, прогорели приствольные бугры в их основании, высота нагаров на стволах составляла 0.9 м от поверхности почвы. Погибло более 80% деревьев. *Пробная площадь 4* расположена на междренном пространстве шириной 106 м. Здесь погиб весь древостой в приканальной полосе: некоторые сосны диаметром 2–4 см сгорели вместе с кронами, несколько живых деревьев сохранилось в середине между каналами. Были выделены секции в зоне, примыкающей к магистральному каналу со стороны бермы (4а), и в удалении от него (4).

Для оценки потерь почвенного углерода был использован метод количественного определения потерь органического материала, предложенный учеными из Канады и США [32] и основанный на разнице концентраций золы между сгоревшим торфом в верхних и нижележащих несгоревших слоях. Зольность торфа определяли в поверхностном выгоревшем и нижележащем несгоревшем слое во всех колонках торфа на каждой секции пробных площадей. Всего было отобрано 50 торфяных колонок. Диаметр колонки составлял 8 см, высота 25 см, площадь ее поверхности 50.2 см². Метод исходит из того, что концентрация золы в пределах верхних 25 см торфа не изменяется по глубине отбора проб. Это фиксируется при определении содержания золы в неповрежденных огнем (контрольных) колонках торфа. Отобранные колонки торфа (рис. 2) разделяли на верхнюю, частично сгоревшую (0–10 см), и нижнюю – несгоревшую (10–20 см) части, где отсутствовали зола и угли. Кроме неизменности зольности в верхнем слое почвы, использованный метод предполагал дополнительные допущения: потеря золы и других продуктов горения торфа в результате водной и ветровой эрозии минимальна с учетом неровностей микрорельефа и защитной роли большей частью

погибших, но еще стоящих деревьев; вклад золы, образовавшейся в результате горения напочвенного покрова (кустарничков, мха), частично опада и сфагнового оочеса, не влияет существенно на результаты расчета потерь углерода.

В каждом сгоревшем и не поврежденном огнем образце определяли концентрацию золы [1] в трех повторностях. Концентрация золы в поверхностном слое состояла из золы несгоревшего и сгоревшего торфа, что привело к увеличению ее концентрации (по сравнению с нижележащим слоем) и уменьшению концентрации органического вещества (углерода) в этом слое. После оценки количества избыточной золы в поверхностном слое торфа рассчитывали количество исходного органического вещества, в результате сгорания которого образовалась эта зола. Затем количество избыточной золы умножали на соотношение органическое вещество/зола соответствующей нижней, несгоревшей части торфа.

Определение содержания углерода в образцах торфа проводили на факультете почвоведения МГУ им. М.В. Ломоносова методом сухого сжигания в токе кислорода на экспресс-анализаторе АН-7529 (Гомель, Белоруссия) с кулонометрическим окончанием, масса навески 50 мг. Для расчетов потерь углерода было принято среднее содержание углерода, равное 53%.

Кроме средних и средних квадратических отклонений для полученных значений потерь углерода по каждой секции пробных площадей были рассчитаны выборочные медианные значения $K_{0,5}$, первый и третий выборочные квартили $K_{0,25}$, $K_{0,75}$. Получены доверительные интервалы для медианы при уровне значимости 0.25, связанные с критерием Уилкоксона для одной выборки. Для характеристики вариации потерь углерода в пределах пробной площади использован квартильный коэффициент дисперсии $D = (K_{0,75} - K_{0,25}) / (2K_{0,5})$. Рассчитаны значение коэффициента корреляции Кендалла τ и соответствующий уровень значимости p [20] для связи между потерями углерода и УПГВ.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Изучение последствий рассматриваемого пожара показало, что огонь по силе пламени и скорости распространения поражал поверхность площади неравномерно, соответственно микрорельефу, наличию и плотности кустарничкового покрова, характеру древостоя. Более влажные микропонижения, занятые преимущественно сфагновым покровом и мелкими редкими сосенками, поражались огнем значительно реже или с меньшей силой.

Полученные оценки сгоревшего органического вещества (ОВ) и углерода (С) на единицу площади значительно варьировали даже в пределах секций пробных площадей (таблица). Пожар возник в районе пробной площади 1, где огонь бегло прошел по напочвенному покрову и ушел в сторону канала (секция 1а), лишь местами проникая вглубь на 2.5–3.0 см. Средняя глубина прогорания торфа в центре междреннего пространства шириной 160 м была 1–2 см. В некоторых местах избыточной золы вообще не было. Беглый огонь может не затрагивать торфяную почву [7] и переход низового пожара в почвенный происходит не всегда. Средние потери С были больше в середине между каналами, чем в приканальной зоне, 0.83 ± 0.62 и 0.43 ± 0.21 кг С/м² соответственно. Выборочное медианное значение (Me), квартильный коэффициент дисперсии (D) (нижний и верхний предел доверительного интервала медианы при уровне значимости 0.25) для секций 1 и 1а составили $0.22 D = 1.15$ (0.11–2.24) и $0.37 D = 0.70$ (0.04–0.78) кг С/м² соответственно.

Более серьезные повреждения почве огонь нанес на пробной площади 2, где он проникал вглубь на 7–11 см. Здесь, при расстоянии между каналами 60 м, средняя потеря С в середине междреннего пространства (2) составила 0.83 ± 0.53 , а в приканальных зонах – от 1.34 ± 0.26 (2а) до 1.95 ± 1.06 (2б) кг С/м². Выборочные медианные значения потерь С составили: 2– $0.45 D = 0.91$ (0.17–1.50), 2а – $1.13 D = 0.12$ (0.99–1.74), 2б – $2.10 D = 0.43$ (0.06–3.71) кг С/м².

Большой потерей С в приканальной полосе характеризовалась также пробная площадь 4. Здесь, при расстоянии между каналами 106 м, слой сгоревшего торфа был 5–10 см. Потери С составили в середине между каналами (4) и в приканальной зоне (4а): среднее – 1.95 ± 1.01 и 2.57 ± 0.51 кг С/м², выборочные медианные значения – $0.79 D = 2.46$ (0.07–3.07) и $2.23 D = 0.34$ (2.01–3.00) кг С/м² соответственно.

На окрайке болота (пробная площадь 3) выгорание местами достигало 12–15 см. Отчетливо выделялись выгоревшие на 5–15 см вглубь и 1.5–3.0 м участки вокруг деревьев, где расположены скелетные опорные корни. Раскачивание деревьев ветром отрывало покрывающий корни слой торфа, что способствовало его выгоранию. Потеря С здесь была максимальной: среднее – 2.87 ± 0.60 кг С/м², выборочное медианное значение – $2.97 D = 0.63$ (1.99–3.61) кг/м².

Значительные пространственные различия повреждений почвы огнем связаны с изменением его интенсивности по площади. На эти показатели влияют влажность верхнего слоя торфа,

Потери органического вещества (ОВ) и углерода в результате пожара по секциям пробных площадей

№ колонки	Зольность торфа, % от сухого вещества			Потери ОВ, кг/м ²	Потери С, кг С/м ²
	до пожара на глубине 10–20 см	после пожара в слое 0–10 см	разность между слоями		
Пробная площадь 1 – центр межканавного пространства шириной 160 м					
1	4.5	4.5	0.0	0.00	0.00
2	4.1	12.5	8.4	8.45	4.48
3	5.7	6.2	0.5	0.42	0.22
4	5.5	5.5	0.0	0.00	0.00
5	5.3	6.8	1.5	1.09	0.58
6	5.5	6.6	1.1	0.89	0.47
7	5.0	5.1	0.1	0.08	0.04
Среднее	5.0	6.7	1.7	1.56 ± 1.16	0.83 ± 0.62
Пробная площадь 1а – приканальная полоса					
1	4.8	4.8	0.0	0.00	0.00
2	5.5	8.3	2.8	2.23	1.18
3	4.7	5.9	1.2	1.05	0.56
4	5.3	5.4	0.1	0.07	0.04
5	5.3	6.3	1.0	0.70	0.37
Среднее	5.1	6.1	1.0	0.81 ± 0.41	0.43 ± 0.21
Пробная площадь 2 – центр межканавного пространства шириной 60 м					
1	3.6	6.4	2.8	4.52	2.39
2	4.1	4.2	0.1	0.06	0.03
3	3.9	4.4	0.5	0.57	0.30
4	3.9	4.9	1.0	1.14	0.60
Среднее	3.9	5.0	1.1	1.57 ± 1.01	0.83 ± 0.53
Пробная площадь 2а – приканальная полоса					
1	6.6	8.5	1.9	2.14	1.13
2	2.7	5.1	2.4	4.44	2.35
3	6.2	9.2	3.0	2.51	1.33
4	3.3	4.4	1.1	1.58	0.84
5	4.7	6.4	1.7	1.99	1.05
Среднее	4.7	6.7	2.0	2.53 ± 0.50	1.34 ± 0.26
Пробная площадь 2б – приканальная полоса					
1	4.0	7.4	3.4	3.96	2.10
2	6.4	17.5	11.1	7.00	3.71
3	4.4	4.6	0.2	0.12	0.06
Среднее	4.9	9.8	4.9	3.69 ± 2.00	1.95 ± 1.06
Пробная площадь 3 – окраина болота					
1	3.3	8.8	5.5	9.64	5.11
2	3.6	10.7	7.1	10.25	5.43
3	3.1	4.6	1.5	1.77	0.94
4	3.8	5.0	1.2	1.03	0.55
5	3.9	7.2	3.3	5.60	2.97
6	3.5	5.0	1.5	1.47	0.78
7	4.7	11.1	6.4	6.01	3.19
8	4.7	10.0	5.3	8.08	4.28
9	4.7	17.5	12.8	10.49	5.56
10	4.7	7.0	2.3	1.89	1.00
11	4.7	8.8	4.1	3.36	1.78
Среднее	4.1	8.7	4.6	5.42 ± 1.12	2.87 ± 0.60

Таблица (окончание)

№ колонки	Зольность торфа, % от сухого вещества			Потери ОВ, кг/м ²	Потери С, кг С/м ²
	до пожара на глубине 10–20 см	после пожара в слое 0–10 см	разность между слоями		
Пробная площадь 4 – центр межканавного пространства шириной 106 м					
1	4.2	4.2	0.0	0.00	0.00
2	4.3	4.3	0.0	0.00	0.00
3	3.3	3.5	0.2	0.27	0.14
4	4.9	13.6	8.7	8.88	4.71
5	5.0	15.2	10.2	10.21	5.41
6	4.0	6.4	2.4	2.70	1.43
Среднее	4.3	7.9	3.6	3.68 ± 1.90	1.95 ± 1.01
Пробная площадь 4а – приканальная полоса					
1	4.9	9.3	4.4	6.29	3.38
2	4.0	6.8	2.8	4.20	2.23
3	3.9	5.3	1.4	1.79	0.95
4	4.8	7.6	2.8	3.50	1.85
5	4.8	8.9	4.1	4.27	2.26
6	3.9	5.3	1.4	1.61	0.85
7	4.8	17.7	12.9	10.75	5.70
8	2.2	3.7	1.5	4.09	2.17
9	4.0	8.9	4.9	7.05	3.74
Среднее	4.2	8.2	4.0	4.84 ± 0.95	2.57 ± 0.51

напочвенный покров, микрорельеф [23], ветер и другие факторы. По канадским данным, выгорание поверхностного слоя торфа отмечалось лишь на 18% площади [36]. В нашем случае в середине между каналами 10–25% площади не было затронуто пожаром, 40–50% выгорело по кустарничковым синузиям, 20–30% – по микроповышениям и 5–10% – по микропонижениям. Избыточная зольность сильно варьирует по всем пробным площадям. Требуется отбор большего количества колонок торфа, что отмечено и другими авторами [32].

Большие потери С произошли в приканальных зонах. Средняя для всех секций (1, 2, 4) на междренних пространствах потеря С составила 1.22 ± 0.45 кг С/м², $n = 17$, для приканальных (1а, 2а, 2б, 4а) – 1.72 ± 0.31 кг С/м², $n = 22$. Еще больше различались выборочные медианные значения. При этом центры междренных пространств близки по условиям естественным болотам. Максимальные потери С на окрайке болота (пробная площадь 3) объяснимы. Болото залегает на задровых песках, и его краевые части имеют максимальные значения УПГВ, что определяет и меньшую влажность здесь в сухие периоды. Окрайки болот наиболее часто подвергаются пожарам, однако потери торфа в таких условиях “компенсируются”

более интенсивным его приростом и соответственно накоплением С [15]. Значение коэффициента корреляции Кендалла $\tau = 0.25$ (уровень значимости $p = 0.2$) показал слабую, практически отсутствующую связь между потерями С и УПГВ, что видно на рис. 3.

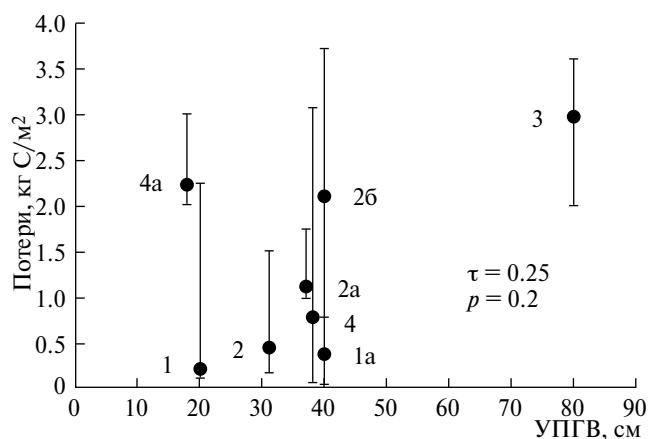


Рис. 3. Выборочные медианные значения потерь почвенного углерода по пробным площадям с доверительными интервалами при уровне значимости 0.25. Показаны значение коэффициента корреляции Кендалла τ и уровень его значимости p для связи между потерями почвенного углерода и УПГВ.

Полученные результаты сравнимы с оценками потери С при пожарах в работах зарубежных авторов (кг С/м²): 4.9 [36], 3.2 [33], 2.5–3.0 [26], 2.2 [32], 2.5 [29], 2.76 – микроповышения и 1.45 – кочки [23]. Они были получены для неосушенных болот и, видимо, для пожаров большей интенсивности. На потери углерода влияет как интенсивность пожара, так и плотность торфа, определяющая запас С. Например, на естественных болотах Среднеамурской низменности потери С при пожарах составили 0.8 кг С/м² при варьировании прогорания почвы от слабой 0–10 см до сильной 0–25 см [11]. При пожаре 2010 г. на осушенном с уплотненной торфяной залежью лесном болоте в Московской области потеря С, даже по весьма консервативной оценке, превысила 10.0 кг С/м² [12].

Результаты подтвердили, что с пожарами могут быть связаны значительные потери С торфяными почвами, но потери углерода при деструкции торфа на заброшенных осушенных торфоразработках могут быть на порядок больше [18]. Учет потерь С при торфяных пожарах, даже будучи методически сложным, необходим для понимания баланса углерода торфяных почв и обоснования мероприятий по их рациональному использованию и охране.

ВЫВОДЫ

1. Повреждение торфяной почвы при пожаре на осушенном верховом лесном болоте было неравномерным. Глубина выгорания была меньше в середине между осушительными каналами, чем вблизи них. В среднем она составляла 1–2 см при расстоянии 160 м, 5–10 см при 106 м и 7–11 см при расстоянии 60 м между каналами. Не затронутая пожаром площадь составляла в целом 10–25%.

2. Использованный метод оценки потерь почвенного углерода, основанный на разнице концентраций золы между сгоревшим торфом в верхних и нижележащих несгоревших слоях торфяной почвы, показал значительное варьирование потерь углерода по площади, поэтому необходим отбор большого количества анализируемых колонок торфа.

3. Потери углерода вблизи осушительных каналов были больше по сравнению потерями на более удаленных участках. Это видно по выборочным медианным значениям (квартильный коэффициент дисперсии; нижний и верхний предел доверительного интервала медианного значения при уровне значимости 0.25) потерь в кг С/м²: 0.37 (0.70; 0.04–0.78) возле каналов и 0.22 (1.15; 0.11–2.24) в центре междреннего пространства при расстоянии между каналами 160 м; 2.23 (0.34; 2.01–3.00) и 0.79 (2.46; 0.07–3.07)

при 106 м, 1.13 (0.12; 0.99–1.74) – 2.10 (0.43; 0.06–3.71) и 0.45 (0.91; 0.17–1.50) при 60 м, соответственно.

4. Максимальные потери углерода были в краевой части болота: среднее – 2.87 ± 0.60 кг С/м², выборочное медианное значение – 2.97 (0.63; 1.99–3.61) кг С/м². Это объясняется низкими уровнями почвенно-грунтовых вод, до 70 см. В целом для всей гари, значение коэффициента корреляции Кендалла $\tau = 0.25$ и уровень его значимости $p = 0.2$ показал слабую, практически отсутствующую связь между потерями С и УПГВ.

5. Полученные результаты потерь почвенного углерода при пожаре (среднее 0.43–2.87, медиана 0.22–2.97 кг С/м²) сравнимы с оценками, полученными другими авторами (1.45–4.9 кг С/м²) и подтверждают, что с пожарами могут быть связаны значительные потери углерода торфяными почвами. Их учет крайне важен для правильного понимания баланса углерода торфяных почв и обоснования их охраны.

Благодарность. Работа проведена при поддержке Программы Президиума РАН “Биоразнообразии природных систем. Биологические ресурсы России: оценка состояния и фундаментальные основы мониторинга”, 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, строительства и безопасности ядерных реакторов Федеративной Республики Германия и управляемого через немецкий банк развития KfW (проект № 11 III 040 RUS К Восстановление торфяных болот) и проекта РФФИ (№ 16-05-00762-а). Авторы признательны С.Э. Вомперскому – организатору и научному руководителю Западновинского лесоболотного стационара, коллегам, участвовавшим в проведении полевых и лабораторных работ: М.В. Смагиной, А.Г. Ковалеву, М.Ю. Зазнобину, А.Е. Ерофееву, а также М.В. Чистотину и М.В. Глаголеву за советы и помощь в статистическом анализе полученных данных.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Базин Е.Т., Копенкин В.Д.* Технический анализ торфа. М.: Недра, 1992. 433 с.
2. *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.

3. *Вомперский С.Э., Иванов А.И., Цыганова О.П., Валяева Н.А., Глухова Т.В., Дубинин А.И., Глухов А.И., Маркелова Л.Г.* Заболоченные органогенные почвы и болота России и запас углерода в их торфах // Почвоведение. 1994. № 12. С. 17–25.
4. *Вомперский С.Э., Минаева Т.Ю., Сирин А.А.* Экосистемы болот. Глава 7. В кн.: Состояние биоразнообразия природных экосистем России / Под ред. В.А. Орлова и А.А. Тишкова. М.: НИИ-Природа, 2004. С. 103–113.
5. *Вомперский С.Э., Сирин А.А., Сальников А.А., Цыганова О.П., Валяева Н.А.* Оценка площади болотных и заболоченных лесов России // Лесоведение. 2011. № 5. С. 3–11.
6. *Вомперский С.Э., Сирин А.А., Цыганова О.П., Валяева Н.А., Майков Д.А.* Болота и заболоченные земли России: попытка анализа пространственного распределения и разнообразия // Изв. РАН. Сер. географ. 2005. № 5. С. 21–33.
7. *Ефремова Т.Т., Ефремов С.П.* Пирогенная трансформация органического вещества почв лесных болот // Почвоведение. 2006. № 12. С. 1441–1450.
8. *Ефремова Т.Т., Ефремов С.П.* Торфяные пожары как экологический фактор развития лесоболотных экосистем // Экология. 1994. № 5. С. 27–34.
9. *Зайдельман Ф.Р.* Проблема защиты осушаемых торфяных почв от пожаров и ее решение // Почвоведение. 2011. № 8. С. 1000–1009.
10. *Инсаров Г.Э., Борисова О.К., Корзухин М.Д., Кудяров В.Н., Минин А.А., Ольчев А.В., Семенов С.М., Сирин А.А., Харук В.И.* Методы оценки последствий изменения климата для физических и биологических систем. Глава 6. Природные экосистемы суши. М.: Росгидромет, 2012. С. 190–265.
11. *Копотева Т.А., Купцова В.А.* Влияние пожаров на функционирование фитоценозов торфяных болот Среднеамурской низменности // Экология. 2016. № 1. С. 14–21. doi: 10.7868/S0367059715060086
12. *Макаров Д.А., Гуммерт И., Суворов Г.Г., Успенская О.Н., Сирин А.А.* Потери почвенного углерода при лесоторфяном пожаре (на примере участка в Московской обл.) // Фундаментальные и прикладные вопросы лесного почвоведения. Мат-лы VI Всерос. научн. конф. по лесному почвоведению. Сыктывкар, 2015. С. 212–214.
13. *Минаева Т.Ю., Сирин А.А.* Биологическое разнообразие болот и изменение климата // Успехи современной биологии. 2011. Т. 131. № 4. С. 393–406.
14. *Минаева Т.Ю., Сирин А.А.* Торфяные пожары – причины и пути предотвращения // Наука и промышленность. 2002. 9 (65). С. 3–8.
15. *Минаева Т.Ю., Трофимов С.Я., Чичагова О.А., Дорофеева Е.И., Сирин А.А., Глушков И.В., Михайлов Н.Д., Кромер Б.* Накопление углерода в почвах лесных и болотных экосистем Южного Валдая в голоцене // Изв. РАН. Сер. биол. 2008. Т. 30. № 5. С. 607–616.
16. *Романов В.В.* Гидрофизика болот. Л.: Гидрометеиздат, 1961. 360 с.
17. *Сирин А., Минаева Т., Возбранная А., Барталев С.* Как избежать торфяных пожаров? // Наука в России. 2011. № 2. С. 13–21.
18. *Суворов Г.Г., Чистотин М.В., Сирин А.А.* Потери углерода при добыче торфа и сельскохозяйственном использовании осушенного торфяника в Московской области // Агрохимия. 2015. № 11. С. 51–62.
19. Торфяные болота России: к анализу отраслевой информации / Под ред. А.А. Сирина, Т.Ю. Минаевой. М.: Геос., 2001. 190 с.
20. *Холлендер М., Вулф Д.* Непараметрические методы статистики. М.: Финансы и статистика, 1983. 518 с.
21. A quick scan of peatlands in Central and Eastern Europe / Eds.: T. Minayeva, A. Sirin, O. Bragg. Wageningen, The Netherlands: Wetlands International, 2009. 132 p. (<http://www.wetlands.org/LinkClick.aspx?fileticket=Az8K7KVj%2bhk%3d&tabid=56>).
22. Assessment on peatlands, biodiversity and climate change: main report / Eds.: F. Parish, A. Sirin, D. Charman, H. Joosten, T. Minayeva, M. Silvius, L. Stringer. Global Environment Centre, Kuala Lumpur and Wetlands International, Wageningen, 2008. 118 p.
23. *Benscoter B.W., Wieder R.K.* Variability in organic matter lost by combustion in a boreal bog during the 2001 Chisholm fire // Can. J. Forest Res. 2003. V. 33. P. 2509–2513.
24. IPCC2014, 2013 Supplement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories: Wetlands / Eds.: T. Hiraishi, T. Krug, K. Tanabe, N. Srivastava, J. Baasansuren, M. Fukuda and T.G. Troxler. Published: IPCC, Switzerland.
25. *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. Cambridge University Press, 2016. P. 66–79.
26. *Kasischke E.S., French N.H.F., Bourgeau-Chavez L.L., Christensen W.L.* Estimating release of carbon from 1990 and 1991 forest fires in Alaska // J. Geophys. Res. Atmos. 1995. V. 100. P. 2941–2951.
27. *Minayeva T., Sirin A.A., Stracher G.B.* The peat fires of Russia // Coal and peat fires: A global perspective / Eds.: G.B. Stracher, A. Prakash, E.V. Sokol. Elsevier, 2012. P. 376–394. doi: 10.1016/B978-0-444-59412-9.00019-3
28. *New S.L., Belcher C.M., Hudspith V.A., Gallego-Sala A.V.* Holocene fire history: can evidence of peat burning be found in the palaeo-archive? // Mires and Peat. 2016. V. 18(26). P. 1–11. 10.19189/Map.2016.OMB.219
29. *Pitkänen A., Turunen J., Tolonen K.* The role of fire in the carbon dynamics of a mire eastern Finland // Holocene. 1999. V. 9. P. 453–462.
30. *Strack M.* (ed.) Peatlands and climate change. International Peat Society. Saarijärven Offset Oy, Saarijärvi, Finland. 2008. P. 44–69.

31. *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. doi: 10.1038/ngeo2325
32. *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. V. 31. P. 363–366. doi: 10.1139/cjfr-31-2-363
33. *Turetsky M., Wieder K., Halsey L., Vitt D.* Current disturbance and diminishing peatland carbon sink // *Geophys. Res. Letters*. 2002. V. 29. P. 211–214. doi: 10.1029/2001GL014000
34. *Wilson D., Blain D., Couwenberg J., Evans C.D., Muddiyarso D., Page S.E., Renou-Wilson F., Rieley J.O., Sirin A., Strack M., Tuittila E.-S.* Greenhouse gas emission factors associated with rewetting of organic soils // *Mires and Peat*. 2016. V. 17. Article 04. 1–28. doi: 10.19189/MaP.2016.OMB.222
35. *World Reference Base for Soil Resources*. 2014. 193 p.
36. *Zoltai S.C., Morrissey L.A., Livingston G.P., de Groot W.J.* Effects of fires on carbon cycling in North American boreal peatlands // *Environ. Rev.* 1998. V. 6. P. 13–24.