

Трансформация органического вещества почв в связи с интенсивностью торфяного пожара (на примере болотного ельника Кузнецкого Алатау)

Т. Т. ЕФРЕМОВА, А. В. ПИМЕНОВ, С. П. ЕФРЕМОВ, А. Ф. АВРОВА

Институт леса им. В. Н. Сукачева СО РАН
(обособленное подразделение ФИЦ КНЦ СО РАН)
660036, Красноярск, Академгородок, 50/28
E-mail: efr2@ksc.krasn.ru

Статья поступила 01.02.2023

После доработки 27.03.2023

Принята к печати 01.04.2023

АННОТАЦИЯ

В рамках экологического направления изучения гумуса с применением традиционных методов и терминов обсуждаются особенности трансформации органического вещества торфяных эвтрофных почв (Hypereutric Sapric Histosols) и глееземов торфянистых (Eutric Histic Gleysols) через 20 лет после лесоторфяного пожара. Объектом исследования послужил зеленомошно-гипновый ельник (*Picea obovata* Ledeb.) восточного склона Кузнецкого Алатау (абсолютная высота 622 м). Состав органического вещества пирогенных почв (0–30 см) характеризуется высокой изменчивостью (коэффициент вариации 12–92 %). По данным факторного анализа, 76 % общей дисперсии обусловлено совокупностью гумусовых веществ, 24 % – полисахаридами. Процедурой кластерного анализа выделено две группы объектов, статистическая достоверность которых подтверждена дискриминантным анализом. Кластеры почв отражают особенности протекания пирогенных процессов – подземного очагового тления, ниже точки возгорания, открытого интенсивного и средней силы пожара. Относительно фоновое содержание углерода 41 % в торфяной почве, не охваченной пожаром, его количество снижается соответственно до 26,5 и 13,4 %. При этом наблюдается практически равное образование продуктов гумификации ($\Sigma ГК + \Sigma ФК$) – 55 и 54 % за счет преимущественно фульвокислот ($C_{тк}/C_{фк}$ 0,2–0,6). Особенности теплового воздействия проявляются главным образом на фракционном уровне. Специфичность подземного тления – повышенный выход фульвокислот 1-й фракции, свободных и рыхло связанных с R_2O_3 . Открытый пожар сопровождается преимущественным образованием гуминовых и фульвокислот, связанных с кальцием. В дискриминацию кластеров, согласно стандартизованных коэффициентов канонического анализа, наибольший совокупный вклад вносят 1-я и 2-я фракции гуминовых и фульвокислот, максимальный персональный вес – ГК-2, ФК-1 и ФК-2. На основе ранее полученных сведений допускаем, что продолжающийся торфогенез может вызвать преобразование фульватного гумуса в фульватно-гуматный и/или гуматный. В случае погребения пирогенной толщи 0–30 см это может произойти примерно через 270 лет, исходя из скорости линейного прироста торфа в ельниках Кузнецкого Алатау, 1,12 мм/год. Результаты исследований подтверждают правомерность традиционного деления гумусовых кислот на фракции.

Ключевые слова: гуминовые кислоты, фульвокислоты, фракционный состав, пирогенез, кластеры почв, подземное очаговое тление, открытый пожар, многомерный статистический анализ.

ВВЕДЕНИЕ действие пожаров. Они оказывают мощное

Болота и заболоченные леса как ландшафтные единицы таежной биоклиматической зоны периодически испытывают воз-

экзогенное воздействие на экосистему, выступая как механизм выхода на новый уровень регулирования устойчивости гидроморфных

комплексов. Происходят изменения видовой структуры растительного сообщества, глубокие преобразования торфяных почв и условий среды – химизма водно-минерального питания, кислотно-основных свойств, состава почвенного воздуха, окислительно-восстановительного режима, микробиологической активности и других процессов. Активная эмиссия CO и CO₂ при торфяных пожарах, лидирующих по объему сгораемого органического вещества на единицу площади, недостаточно учитывается при оценке влияния болотных экосистем на газовый состав атмосферы и флуктуацию климата [Huang, Rein, 2017; Сирий и др., 2019]. Вероятность возникновения торфяных пожаров возрастает ввиду глобального потепления климата и усиления хозяйственной деятельности, при этом эмиссия углерода в атмосферу может достигать 15 % антропогенных поступлений [Poulter et al., 2006; Минаева, Сирий, 2011; Turetsky et al., 2015; Joosten et al., 2016; Глухова, Сирий, 2018; Hu et al., 2018]. Отмечается недостаток натурных исследований и трудности в оценке потерь углерода при пожарах. Предложены в основном косвенные методы учета на основе глубины прогорания торфяной залежи по корневой шейке пней [Joosten et al., 2016], а также сравнения зольности торфа, затронутого огнем и не охваченного в нижележащем горизонте [Turetsky, Wieder, 2001]. Изученный по данным схемам послепожарный баланс углерода в болотах Восточной Финляндии, Канады [Pitkänen et al., 1999; Wieder et al., 2009], а также на лесном олиготрофном массиве Московской области выявил примерно сходную картину: в частности, при варьировании глубины прогорания (15 ± 8)–(20 ± 9) см потери углерода составили $9,8 \pm 5,6$ кг/м², что соответствует накоплению торфа за последние 600–700 лет [Сирий и др., 2019].

Вместе с тем практически не рассматриваются потери углерода в сохранившейся от выгорания торфяной толщ (механический и химический недожог). На текущий момент установлено, что величина потерь углерода в эвтрофной пирогенной почве в зависимости от силы теплового воздействия составила 0,4–6,3 (кг·С)/м², что эквивалентно выбросам в атмосферу углекислого газа от 1,4 до 23 кг/м² или 14–230 т CO₂ на гектар [Ефремова и др., 2021].

Поддержание устойчивого функционирования биогеоценоза обеспечивается в том числе качественным составом и запасами гумуса в почвах. Однако критерии (параметры), по которым можно было бы судить о глубине преобразования органического вещества в процессе термического воздействия, разработаны слабо. Что же касается торфяных пирогенных почв, то их гумусное состояние практически не изучено на текущий период. В этом направлении выполнены единичные исследования [Ефремова, Ефремов, 2006]. Установлено существенное увеличение в олиготрофных и мезотрофных торфах, преимущественно погребенных, содержания липидов (воскоsmол, битумов), которое сочетается с новоприобретенным уникальным свойством субстрата – пластичностью. На фоне выраженного снижения веществ углеводной природы, нерастворимого и негидролизуемого остатка образуются гумусовые вещества, количество которых определяется интенсивностью пожара и глубиной залегания горизонта, обеспечивающей в свою очередь доминирование в составе гумусовых компонентов гуминовых кислот. Послепожарное торфонакопление сопровождается углефикацией погребенных пластов. Как считают В. Е. Раковский, Л. В. Пигулевская, углефикация – результат вторичных процессов дегидратации, конденсации и преимущественно декарбоксилирования в процессе диагенеза [Раковский, Пигулевская, 1978]. В лабораторных опытах по мокрому обугливанию торфа установлен факт стадийного распада органических соединений торфа в температурном режиме 150–350 °С при влажности 25–75 % [Раковский и др., 1959]. С таких позиций информации о пирогенных преобразованиях торфяного субстрата в условиях природной среды нами не найдено.

Цель настоящей работы – выявить специфику гумусного состояния пирогенных почв, пройденных огнем различной интенсивности, и обосновать возможность ее использования в качестве показателя этапов трансформации органического вещества торфяного субстрата. В отечественной литературе такого рода информация рассматривается впервые. Она важна для выработки критериев глубины преобразования гумусного состояния пирогенных почв и понимания закономерностей послепожарной сукцессии болотных экосистем.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Исследовали интразональные болотные ельники долинных комплексов малых рек Алтае-Саянской горной страны, которые относятся к числу практически не охваченных исследованиями. Изучался зеленомошно-гипновый ельник (*Picea obovata* Ledeb.) Va класса бонитета в заболоченной долине р. Тунгужуль (1,8 тыс. га) на абсолютной высоте 622 м восточного макросклона Кузнецкого Алатау. Весной 1999 г. более 200 га торфяного массива было охвачено крупным лесо-торфяным пожаром. В настоящее время площадь покрыта густым, трудно проходимым березняком (*Betula pubescens* Ehrh.) кустарниковым осоково-зеленомошным. Возраст березняков – 17–20 лет – соответствует послепожарному периоду.

Вдоль русла реки в 25–35 м от берегового вала заложили эколого-пирологическую трансекту (географические координаты – 54°14'24.70" с. ш., 89°35'59.40" в. д.). В пределах трансекты разбили пять пробных площадей (участков) на расстоянии 50–60 м друг от друга. В данной статье обсуждается влияние огневого воздействия на мочажины – доминирующие элементы микрорельефа пожарища. Господство отрицательных форм микрорельефа в бореальных торфяниках, пройденных пожарами, показана и другими авторами [Dyrness, Norum, 1983; Benschoter et al., 2015].

Эвтрофные почвы пожарища (Hypereutric Fibric Histosols) [Классификация ..., 2004; Мировая реферативная база..., 2017] относятся к подтипу пироторфяных [Классификация почв России, 2000]. По совокупности показателей – содержанию углерода

и физико-химическим свойствам (величина рН, объемная влажность, зольность, плотность сложения), в пределах пожарища выделено четыре кластера пирогенных почв [Ефремова и др., 2021], объединяющих от одного до четырех участков (рис. 1, а). Они образуют следующую почвенную комбинацию: кластер I (участок М-9) – пирогенные торфяные почвы; кластер II (М-1, М-2, М-3) – глееземы торфянистые; кластер III (М-4, М-5, М-6, М-8) – глееземы мелкоторфянистые; кластер IV (М-7, М-10) – пирогенные деструктивные почвы. Пирогенные торфяные почвы (механический и химический недожог) представляют в основном плотную, хорошо разложившуюся растительную субстанцию, сложенную, как правило, непрочными ореховато-зернистыми структурными отдельностями, практически одинаковой темно-бурой окраски, высокозольную, влажную, обильно насыщенную живыми корнями в поверхностных слоях. За пределами ризосферы – пластичная гомогенная масса, которая свободно скатывается в “шнур”, подобно глине. Интенсивность огневого воздействия на торфяную залежь оценивали косвенно по следующим морфологическим признакам: сохранность подстилки, ее мощность и строение, толщина невыгоревшего (пироторфяного) субстрата, обилие углей, наличие прослоек пирогенной золы, углистых примазок, степень пластичности (липкости) торфа (табл. 1). В соответствии с данными признаками можно допустить, что почвы кластеров I, II испытали воздействие подземного очагового тления в различных температурных

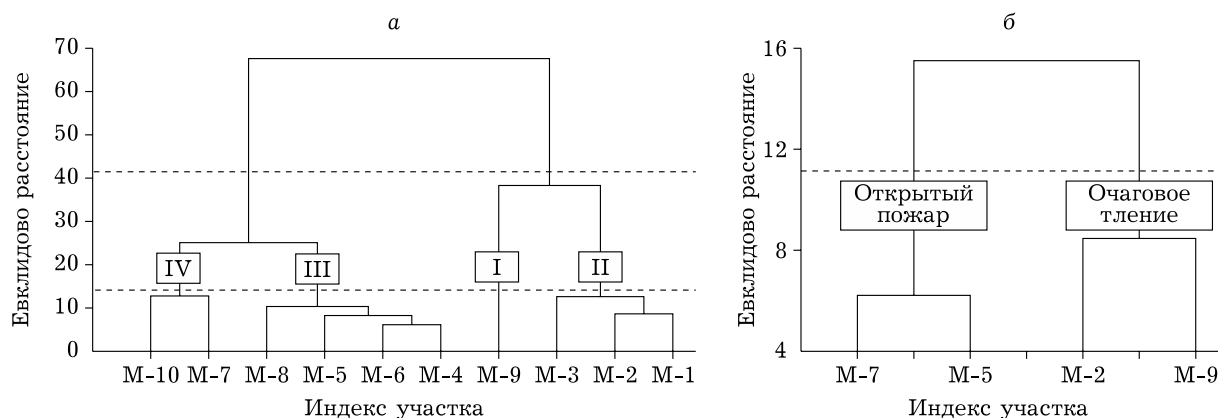


Рис. 1. Диаграммы объединения пирогенных почв. Кластеризация по данным общего углерода и физико-химическим показателям (а), по качественному составу органического вещества (б). I–IV – кластеры

Т а б л и ц а 1

Морфологические признаки огневого воздействия в кластерах пирогенных эвтрофных почв (0–30 см), сгруппированных по совокупности данных – содержанию углерода и физико-химическим показателям [Ефремова и др., 2021]

Признак огневого воздействия	Индекс кластеров			
	I	II	III	IV
	Глубина проявления пирогенных признаков, см			
Строение подстилки	LF	LF	L	L
Мощность – минимум – максимум, см	3–7	2–6	1–4	0,5–3
Следы пожара:				
мелкие угли	0–1	0–2(4)	0–8	0–4
сажистые примазки	–	2–12	–	–
прослойка золы 2–3 см	–	–	–	4–12
Пластичность торфа – состояние “шнура” при скатывании:				
распадается – β_1	12–18	–	–	–
образует трещины – β_2	–	10–17	–	–
сплошной – β_3	–	–	15–20	12–19(24)
Агрегированность ореховато-зернистыми элементами структуры, %:				
явная	50–70	20–50	75–100	70–100
при нарушении сложения	–	100	–	–
Участие беспозвоночных (визуальная частота встречаемости):				
энхитреиды	–	9–18 (++)	0–17 (++)	0–4 (+)
дождевые черви	–	2–10 (+)	0–15 (+)	0–15 (+)

П р и м е ч а н и е. Участки в составе кластеров, см. рис. 1, а, подгоризонты подстилки: L – листовый, F – ферментативный, прочерк – признак не диагностируется. Встречаемость: (++) – частая, (+) – редкая.

режимах ниже точки возгорания, хотя стадии “раскаленных точек” имели место (мелкие угли в поверхностных слоях). В большей мере такое допущение базируется на строении подстилок. Они состоят из листовым и ферментативным подгоризонтами мощностью 4–5 см, что соответствует строению торфянистых подстилок вне пожарища. Пирогенные почвы кластеров III и IV, вероятнее всего, пройдены открытым, довольно интенсивным пожаром. Маломощные подстилки (2 см) в виде листового подгоризонта L состоят из остатков современной растительности (преимущественно березы), а торфяной субстрат отличается высокой пластичностью – при скатывании образует сплошной “шнур”. Подробное морфолого-генетическое строение кластеров почв охарактеризовано в публикации [Ефремова и др., 2021].

Торфяные почвы отбирали в виде монолитов 35 × 35 × 40 см в четырех повторностях и разграничивали на горизонты в пре-

делах корнеобитаемой зоны современных почв (0–30 см). Физико-химические свойства почв определяли следующим образом: зольность – сжиганием в муфельной печи при температуре 750 °С, рН – потенциометрически [Аринушкина, 1970], обменные кальций и магний – комплексометрическим титрованием, полуторные оксиды – осаждением уротропином в составе декальцината (0,1 н. H₂SO₄) в ходе анализа состава органического вещества [Аринушкина, 1970; Пономарева, Николаева, 1980].

Изменение состава органического вещества в связи с интенсивностью пожара изучали на примере пирогенных почв участков, которые по физико-химическим характеристикам наиболее приближены к средним показателям кластеров, в состав которого они объективно включены. Условно приняли, что почвы испытывали слабое очаговое тление на участке М-9, умеренное очаговое тление – на М-2, открытого пожара средней силы – на М-5,

открытого интенсивного – на М-7. Средне-взвешенные физико-химические данные в пределах верхних 30 см пирогенных почв показывают, что по мере нарастания термического воздействия нейтральная реакция среды последовательно смещается в щелочной интервал, вдвое увеличивается содержание щелочноземельных металлов и зольных веществ, несколько слабее, в 1,3 раза, полуторных оксидов (рис. 2, а, б).

Групповой и фракционный состав органического вещества, который лежит в основе характеристики гумусного состояния почв, определяли по полной методике, разработанной для торфяно-болотных почв [Пономарева, Николаева, 1959, 1980]. Под групповым составом понимается количественное содержание специфических и неспецифических соединений. Под фракционным – распределение веществ по форме и/или прочности связи с минеральными компонентами в группе органических соединений. Фракционный состав трактуется как функция минеральной составляющей почв и определяется в большинстве случаев абиотическими, часто вторичными процессами [Орлов, 1990].

В ходе последовательной экстракции гумусовых веществ выделяются следующие фракции. Фракция 1 – подвижная, свободная и рыхло связанная с полуторными оксидами, переходящая непосредственно в раствор 0,1 н. NaOH; фракция 2, связанная с Ca^{2+} и Mg^{2+} , экстрагируемая раствором 0,1 н. NaOH после декальцирования; фракция 3 – прочно связанная с устойчивыми полуторными оксидами, пептизируемая 0,02 н. щелочью

на водяной бане. Декальцинат, 0,1 н. H_2SO_4 , отождествляет наиболее агрессивную фракцию фульвокислот ФК-1а.

В последние десятилетия появились новые методы исследования гумусовых кислот. Получены оригинальные экспериментальные данные, раскрывающие структуру ГК и ФК. Вновь обострилось противостояние мнений о сущности гумусовых веществ, механизмах их формирования и специфичности химического строения. Материалы дискуссий обстоятельно и критически рассмотрены в текущих обзорах известных отечественных специалистов в области изучения гумуса [Дергачева, 2021; Заварзина и др., 2021]. Сделан вывод, что парадигма о гумусовых органических соединениях как специфических природных веществах почвенного генезиса, отличных от биомолекул растительных и микробных тканей, до сих пор не вытеснена другими концепциями, но требует дальнейших исследований. Предлагается сохранить название “гуминовые” и “фульвокислоты” как устоявшиеся групповые понятия. Рекомендуются усилить изучение специфики состава и свойств гумусовых соединений в связи с экологическими условиями, что имеет огромное значение в прогнозировании изменяющейся природной среды, естественный ход которой нарушен антропогенным вмешательством. В этом контексте подчеркивается необходимость и целесообразность применения единых традиционных методов анализа, общепринятых терминов и понятий. Обсуждаемая в представленной статье трансформация органического вещества торфяных почв по мере

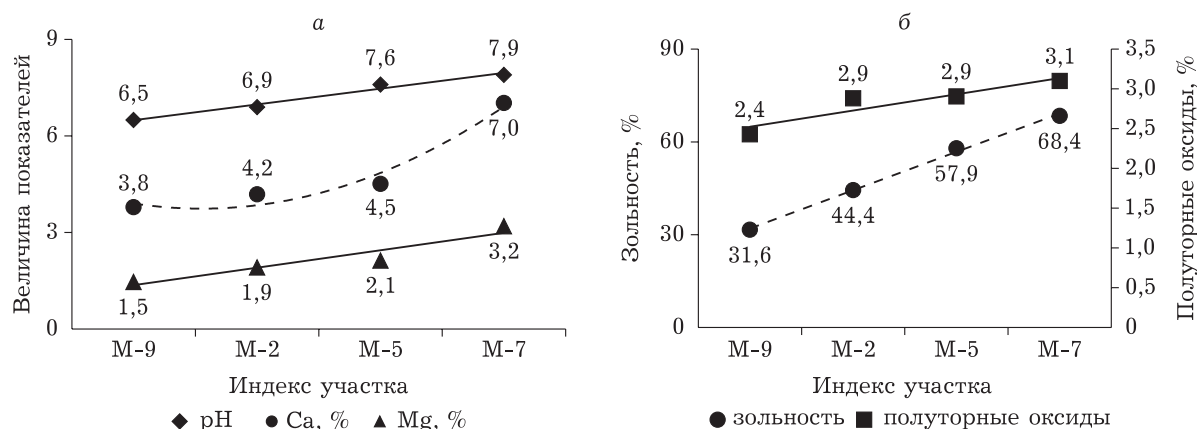


Рис. 2. Физико-химические свойства эвтрофных пирогенных почв:

а – величина pH и содержание щелочноземельных металлов; б – зольность и содержание полуторных оксидов

нарастания интенсивности пожара отвечает экологическому направлению в изучении гумусовых веществ. Используемая нами схема анализа группового и фракционного состава В. В. Пономаревой на основе эффективного метода И. В. Тюрина является стандартным, классическим приемом извлечения гумусовых веществ и выделения препаратов.

Пластичность торфяного субстрата оценивали, пользуясь рекомендациями Н. А. Качинского [1965]. Многомерный статистический анализ выполнен по руководству А. А. Халафяна [2007].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Состав органического вещества. В силу высокой мозаичности и рассредоточенности

пожара по площади горения состав органического вещества пирогенных почв характеризуется значительным колебанием изученного набора признаков (табл. 2, 3). Наибольшей вариабельностью отличаются гумусовые кислоты, связанные с кальцием, коэффициент вариации (C_v) – ГК-2–92 %, ФК-2–59 %. Глубину преобразования органического вещества пирогенных почв оценивали относительно фона торфяных почв болотного ельника, не пройденного пожаром, который расположен вверх по руслу р. Тунгжуль, в 4–5 км от гари. Как следует из рис. 3, а, средневзвешенное содержание углерода относительно фонового (41,1 %) последовательно снижается в 1,4, 1,9, 2,4 и 4,4 раза мере нарастания силы огня. Аналогичные процессы сопровождают азот, количество которого по сравне-

Т а б л и ц а 2
Гумусное состояние пирогенных эвтрофных почв, % к $C_{\text{общ}}$

Индекс горизонта	Глубина, см	C, %	N, %	C/N	ΣГК*	ΣФК	(ΣГК + ΣФК)	$C_{\text{тк}}/C_{\text{фк}}$	Полисахариды	Остаток
М-9 – участок слабого подземного очагового тления, почвы – торфяные										
O _{LF}	0–5	31,1	1,7	18,5	10,5	37,5	48,0	0,28	11,5	40,5
T1	5–12	34,6	1,9	17,9	14,3	34,4	48,7	0,41	11,7	39,6
T2b ₁	12–30	30,8	1,4	21,4	16,5	36,8	53,3	0,45	11,3	35,4
М-2 – участок умеренного подземного очагового тления, почвы – глееземы торфянистые										
O _{LF}	0–4	31,3	1,5	21,1	8,5	39,3	47,8	0,22	13,9	39,6
T1	4–10	25,5	1,2	22,0	12,5	40,2	52,8	0,30	12,1	37,2
T2b ₂	10–21	21,8	0,9	23,4	15,0	39,8	54,8	0,38	12,2	35,5
C	21–28	15,7	0,5	30,8	14,0	50,2	64,2	0,28	9,0	28,2
М-5 – участок открытого пожара средней силы, почвы – глееземы мелкоторфянистые										
O _L	0–2	19,6	1,2	16,5	20,1	35,4	55,5	0,57	10,6	33,9
T	2–18	20,7	1,1	19,5	18,0	34,6	52,6	0,52	7,1	40,4
TRb3	18–30	13,8	0,4	32,1	21,2	34,7	55,8	0,61	9,4	34,7
М-7 – участок открытого сильного пожара, почвы – деструктивные										
O _L	0–2	18,1	1,0	18,3	19,7	33,1	52,8	0,60	5,0	37,3
TR1b3	2–8	9,7	0,4	23,0	24,9	36,1	61,1	0,69	5,1	28,8
TR2b3	8–15	10,0	0,4	23,3	18,6	38,4	57,0	0,49	7,1	28,8
C	15–30	7,3	0,3	27,0	19,0	36,3	55,2	0,52	7,0	30,8
Коэффициент вариации, %		43	53	21	33	12	9	38	18	13

П р и м е ч а н и е. О – подстилка; L – листовой, F – ферментативный подгоризонты; T – торфяной горизонт; TR – органоминеральный горизонт; b1, b2, b3 – степень пластичности торфа (см. табл. 1); C – подстилающая порода.

Групповой и фракционный состав органического вещества пирогенных почв, % к $C_{\text{общ}}$

Индекс горизонта	Глубина, см	Фракция гуминовых кислот			Фракция фульвокислот				Вещества, гидролизуемые H ₂ SO ₄	
		1	2	3	1-а	1	2	3	1,0 н.	80 %
М-9 – участок слабого подземного очагового тления, почвы – торфяные										
O _{LF}	0–5	1,9	0,7	7,9	3,1	16,2	2,6	15,8	6,1	5,4
T1	5–12	1,4	0,2	12,7	2,4	14,5	2,3	15,3	6,1	5,6
T2b ₁	12–30	1,3	0,2	15,0	3,0	12,1	2,8	18,9	5,9	5,3
М-2 – участок умеренного подземного очагового тления, почвы – глееземы торфянистые										
O _{LF}	0–4	1,7	0,4	6,4	3,4	18,2	3,1	14,6	7,3	6,6
T1	4–10	2,6	0,5	9,5	4,5	15,4	4,7	15,6	6,4	5,7
T2b ₂	10–21	3,2	1,1	10,7	4,2	15,8	2,9	16,9	6,0	6,2
C	21–28	4,7	1,5	7,8	5,9	15,7	7,0	21,6	4,4	4,6
М-5 – участок открытого пожара средней силы, почвы – глееземы мелкторфянистые										
O _L	0–2	4,1	4,9	11,1	7,4	6,3	8,9	12,9	4,0	6,6
T	2–18	2,4	3,9	11,6	3,7	5,9	10,8	14,2	4,0	3,1
TRb3	18–30	2,3	6,3	12,6	3,1	6,9	12,5	12,3	5,9	3,6
М-7 – участок сильного открытого пожара, почвы – деструктивные										
O _L	0–2	4,4	5,0	10,3	7,2	6,0	9,3	10,7	2,2	2,8
TR1b3	2–8	4,2	9,7	11,0	4,0	7,6	11,9	12,6	3,2	1,9
TR2b3	8–15	2,9	6,2	9,6	3,0	8,5	13,3	13,6	4,1	3,0
C	15–30	3,3	5,0	10,7	3,4	7,1	14,4	11,3	4,8	2,2
Коэффициент вариации, %		39	92	31	38	42	59	22	27	22

П р и м е ч а н и е. Усл. обозн. см. табл. 2.

нию с естественным торфяным субстратом (1,4 %) падает в 1,5–3,4 раза. Потери общего углерода и азота сопровождаются накоплением гумусовых веществ. Относительно степени гумификации почв фонового объекта ($\Sigma ГК + \Sigma ФК$, % к $C_{\text{общ}}$) – 25,5 % торфяная толща, пройденная пожаром различной интенсивности, содержит в 2–2,3 раза больше гуминовых и фульвокислот и, можно сказать, слабо зависит от силы теплового воздействия. Аналогичная ситуация в отношении C/N (косвенный показатель биологической активности), которое снижается до 20–25 раз по сравнению с исходной до пожара величиной – 51,4 (рис. 3, б). Такие же выводы приме-

нимы к нерастворимому и негидролизуемому остатку, количество которого в пирогенной толще сокращается в 1,4 раза относительно 51,6 %. Среди компонентов органического вещества по мере усиления пожара снижается в 1,1–1,9 раза количество полисахаридов. В составе гумусовых компонентов пирогенных почв преобладают фульвокислоты (см. табл. 2). В режиме тления гуматно-фульватный гумус фоновых торфяных почв ($C_{ГК}/C_{ФК} = 0,82$) трансформируется в очень фульватный ($C_{ГК}/C_{ФК} = 0,28–0,45$), а под воздействием открытого пожара средней силы и интенсивного – в фульватный ($C_{ГК}/C_{ФК} 0,54–0,58$) (оценка по: [Орлов и др., 2004]).

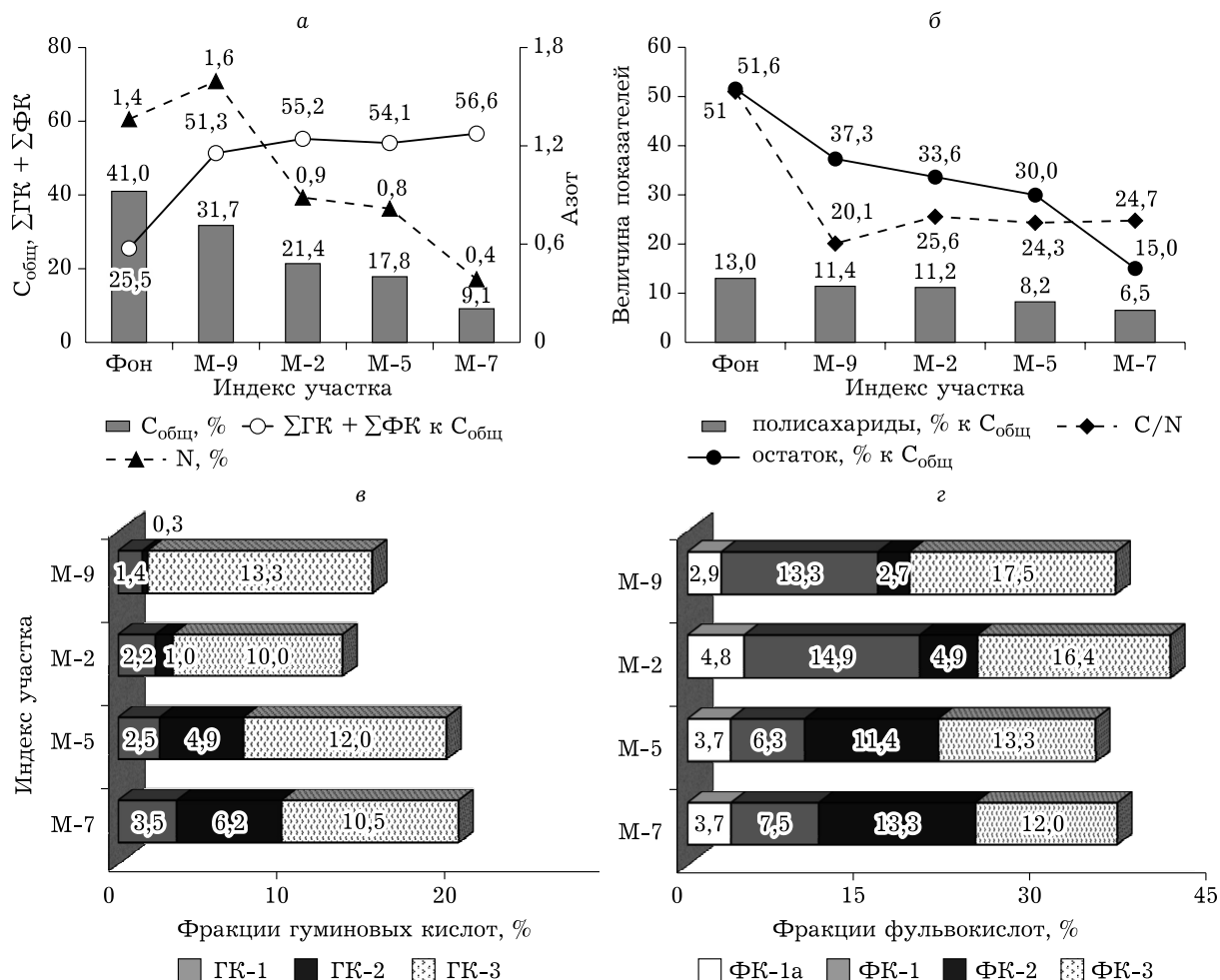


Рис. 3. Гумусное состояние пирогенных почв 0–30 см. Средневзвешенные данные:

а – содержание общего углерода, азота, гумусовых веществ; б – отношение C/N, количество полисахаридов, нерастворимого и негидролизуемого остатка; в – фракционный состав гуминовых кислот; г – фракционный состав фульвокислот. Участки почв, протестированные видами и силой пожара: М-9 – слабое очаговое тление, М-2 – умеренное очаговое тление, М-5 – открытый средней силы пожар, М-7 – открытый интенсивный пожар

С глубиной в пирогенной толще снижается количество углерода и азота, но возрастает содержание гумусовых компонентов на фоне расширения отношения C/N (см. табл. 2). Это свидетельствует, скорее всего, об абиотическом синтезе гумусовых соединений, так как при температуре 150–200 °C почва становится практически стерильной [Sacamoto Kazunori et al., 1992]. Биохимический синтез возможен после остывания торфяного субстрата до температуры около 100 °C и ниже, при которой еще обнаруживается микробиологическая деятельность [Заварзин, Колотилова, 2001]. Освоенность пирогенной толщи беспозвоночными-гумусообразователями (энхетреидами и дождевыми червями) подтверждает, в свою очередь, наличие биохими-

ческой гумификации, хотя ее вклад, по всей вероятности, уступает абиотическому пути.

В составе пирогенных эвтрофных почв доминирует 3-я фракция гуминовых и фульвокислот, сохраняя характерную для данного типа почв особенность фракционного состава [Ефремова, 1975]. Содержание кислот с глубиной, как правило, имеет тенденцию к некоторому возрастанию (см. табл. 3). Примерно также ведут себя гумусовые кислоты 2-й фракции, связанные с кальцием. Распределение в профиле почв гуминовых кислот 1-й фракции, свободных и рыхло связанных с R_2O_3 , скорее, спонтанное.

Вместе с тем обнаруживается специфичность фракционного состава гумусовых кислот в пирогенной толще, испытавшей слабое

термическое воздействие (подземное тление) и интенсивный огонь (устойчивый низовой пожар). В группе гуминовых кислот наиболее выражено на силу пожара реагирует 2-я фракция (рис. 3, в). Так, средневзвешенное содержание ГК-2 в слое 0–30 см, равное 0,3 % в случае слабого теплового влияния, последовательно возрастает в 3,3, 16 и 22 раза при усилении огня до умеренного, среднего и интенсивного. Количество гуминовых кислот 1-й фракции при этом слабо повышается, ГК-3 практически не изменяется – 11–13 %. В группе фульвокислот при слабом и умеренном очаговом тлении содержание ФК-1 примерно близкое – 13,3 и 14,95 %, как и ФК-3 – 16,4–17,5 % (рис. 3, г). Количество ФК-2, подобно гуминовым кислотам, в случае умеренного, среднего и сильного теплового воздействия увеличивается соответственно в 1,8, 4,2 и почти 5 раз относительно слабого. Активное образование фракции ФК-2 при усилении термического режима протекает на фоне снижения ФК-1 в 2 раза и менее выраженного ФК-3 – в 1,4 раза.

Таким образом, 3-я фракция гумусовых кислот, реагируя положительно на тепловое воздействие, отличается от других определенным порогом термической устойчивости.

Установлено, что в торфяных почвах болотных экосистем гумусообразование активно регулируется реакциями окислительно-восстановительного характера, а гуминовые кислоты 3-й фракции являются наиболее восстановленными соединениями [Ефремова, 1992]. Поэтому они оказываются достаточно устойчивыми в режиме недостаточной аэрации при пожарах. Одним из самых окисленных продуктов торфяного гумуса являются фульвокислоты 1-й фракции, количество которых значительно сокращается при сильном пожаре вследствие явного ухудшения окислительной обстановки.

Многомерный анализ состава органического вещества. В качестве дополнительной информации о составе органического вещества пирогенных почв и дальнейшей ступени статистического анализа наблюдаемых признаков использовали корреляционную матрицу (табл. 4). Согласно коэффициентам корреляции, подавляющее большинство признаков в основном тесно положительно взаимосвязаны, отрицательную сопряженность практически со всеми показателями обнаруживают гуминовые и фульвокислоты, связанные с кальцием (ГК-2 и ФК-2). Объединение коррелированных переменных с целью выделения

Т а б л и ц а 4

Коэффициенты корреляции Спирмена показателей состояния органического вещества пирогенных почв, рассчитанных на навеску

Показатель	С	N	ГК-1	ГК-2	ГК-3	ФК-1a	ФК-1	ФК-2	ФК-3	ГМ*	Ц**	Ост
С		0,95	0,34	–0,72	0,67	0,54	0,95	–0,49	0,94	0,89	0,96	0,98
N	0,95		0,39	–0,56	0,76	0,63	0,89	–0,34	0,88	0,80	0,93	0,94
ГК-1	0,34	0,39		0,11	0,19	0,85	0,42	0,06	0,31	–0,01	0,42	0,28
ГК-2	–0,72	–0,56	0,11		–0,26	–0,10	–0,73	0,74	–0,81	–0,77	–0,70	–0,68
ГК-3	0,67	0,76	0,19	–0,26		0,40	0,49	–0,06	0,65	0,54	0,56	0,75
ФК-1a	0,54	0,63	0,85	–0,10	0,40		0,61	0,05	0,50	0,27	0,65	0,51
ФК-1	0,95	0,89	0,42	–0,73	0,49	0,61		–0,53	0,93	0,83	0,96	0,91
ФК-2	–0,49	–0,34	0,06	0,74	–0,06	0,05	–0,53		–0,56	–0,50	–0,53	–0,43
ФК-3	0,94	0,88	0,31	–0,81	0,65	0,50	0,93	–0,56		0,81	0,92	0,92
ГМ	0,89	0,80	–0,01	–0,77	0,54	0,27	0,83	–0,50	0,81		0,85	0,89
Ц	0,96	0,93	0,42	–0,70	0,56	0,65	0,96	–0,53	0,92	0,85		0,92
Ост	0,98	0,94	0,28	–0,68	0,75	0,51	0,91	–0,43	0,92	0,89	0,92	

П р и м е ч а н и е. ГМ – гемицеллюлозы; Ц – целлюлоза; Ост – нерастворимый и негидролизуемый остаток. Заливкой выделены коэффициенты, значимые на уровне $\alpha = 0,05$.

Факторная структура гумусного состояния пирогенных почв (связь показателей с выделенными факторами)

Показатель	Фактор 1	Фактор 2	Фактор 3
ГК-1	-0,40	0,81	0,42
ГК-2	-0,99	0,06	0,13
ГК-3	-0,23	-0,97	-0,09
ФК-1a	0,14	0,99	0,09
ФК-1	0,93	0,28	0,23
ФК-2	-0,98	0,15	0,10
ФК-3	0,98	0,21	0,04
Гемицеллюлоза	-0,17	0,22	0,96
Целлюлоза	0,17	0,09	0,98
Собственные значения фактора	4,05	2,78	2,16
Доля объясненной дисперсии	0,45	0,31	0,24
Процент объясненной дисперсии	45	31	24

скрытых общих факторов, объясняющих связи между наблюдаемыми признаками, выполнили методом факторного анализа. Использовали только непосредственно определяемые аналитические данные, исключив расчетные. Применили процедуру ортогонального вращения осей (варимакс), что позволяет наилучшим образом проинтерпретировать выделенные факторы. Согласно табл. 5, три фактора, собственные числа которых больше 1, в соответствии с критерием Кайзера эквивалентны существенной доле выделяемой дисперсии. Факторные нагрузки базируются на значениях коэффициентов корреляции, чем выше, тем в большей степени переменная связана с выделенным фактором, знак коэффициента не имеет внутреннего содержания [Ким Дж.-О. и др., 1989]. Первый фактор объясняет 45 % общей дисперсии, второй – 31, на долю третьего фактора приходится 24 %. Первые два фактора, которые описывают в сумме 76 % общей дисперсии корреляционной матрицы, группируют все фракции гуминовых и фульвокислот. Следовательно, вариабельность органического вещества пирогенных почв обусловлена в основном трансформацией их гумусного состояния.

Достоверность различий пирогенных почв, пройденных пожаром различной интенсивности, оценили с помощью квадратов расстоя-

ний Махаланобиса и уровней их значимости методом дискриминантного анализа. Наиболее близкими по свойствам, достоверно не различающимися на 5%-м уровне значимости, оказались участки М-9 и М-2, испытавшие слабое и умеренное тепловое воздействие вследствие подземного тления, а также М-5 и М-7, пройденные открытым пожаром средней силы и интенсивным (табл. 6). Процедура кластерного анализа на основе данных гумусного состояния обеспечила разделение участков пирогенных почв на две группы (рис. 1, б), которое соответствует их объединению по физико-химическим показателям, но на более высоком уровне по сравнению с физико-химическими показателями и общему углероду (см. рис. 1, а).

Кластеры почв, пройденные открытым пожаром, отличаются от почв очагового подземного тления значительными потерями органического углерода относительно фона – 41 % (рис. 4, а). Если в первом случае содержание углерода снижается в 3, то во втором – лишь в 1,6 раза. На фоне значительных потерь углерода активно возрастает интенсивность гумификации пирогенного субстрата за счет преимущественно фульвокислот. Оба вида пожара сопровождаются приблизительно равным образованием гумусовых веществ, в составе которых доминирует 3-я

Достоверность различия средних состояний органического вещества пирогенных почв
на отдельных и сгруппированных участках – кластерах

Индекс участков	Квадрат расстояний Махаланобиса, p -уровень значимости					
	М-9	М-2	М-5	М-7	Сгруппированные участки	(М-9 + М-2) (М-5 + М-7)
М-9		18	731	902	(М-9+М-2)	673
М-2	0,708		658	807	(М-5+М-7)	0,0003
М-5	0,040	0,039		28		
М-7	0,029	0,027	0,576			

П р и м е ч а н и е. Над чертой – квадраты расстояний Махаланобиса, под чертой – p -уровни значимости различий.

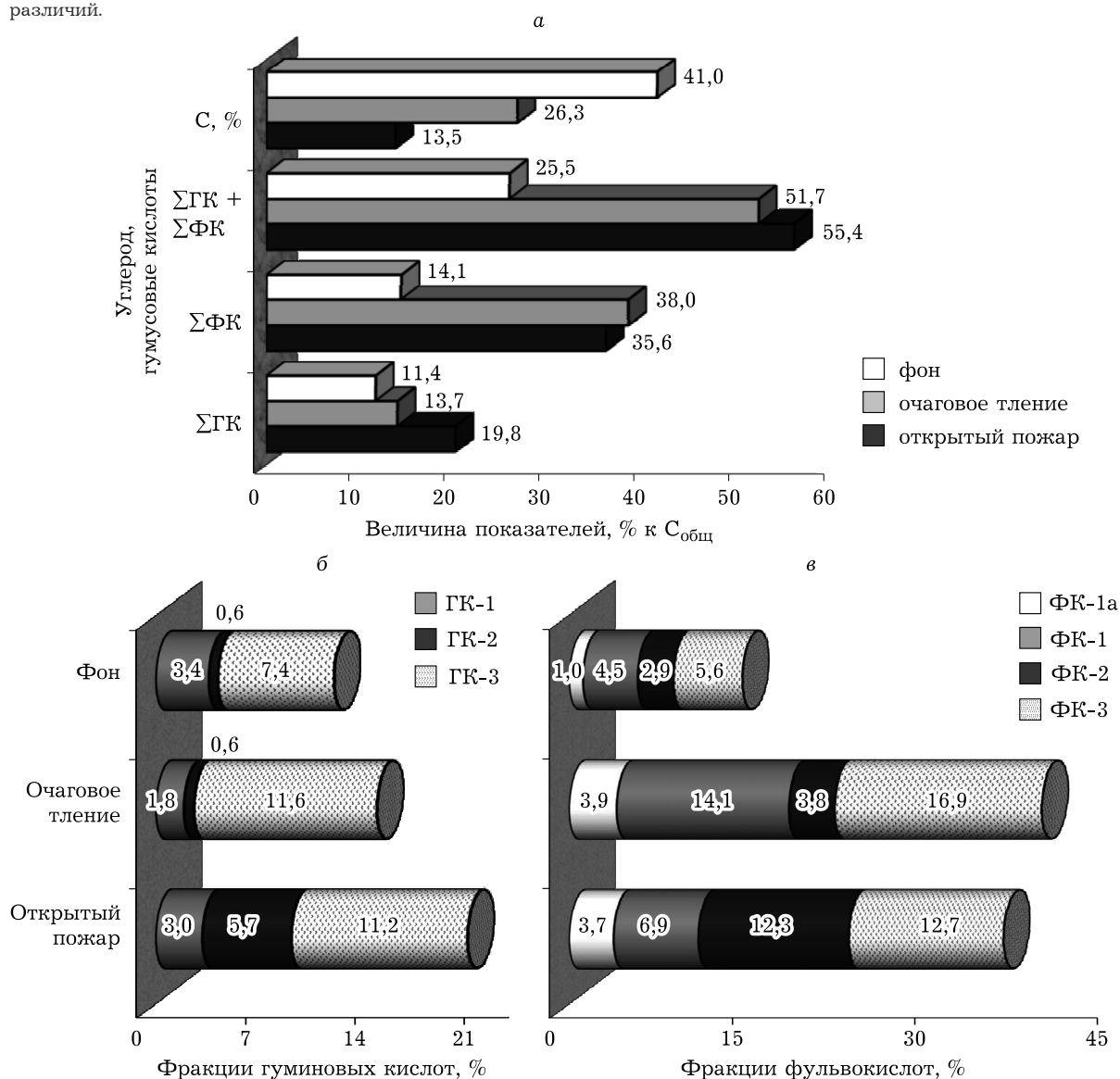


Рис. 4. Групповой и фракционный состав органического вещества эвтрофных почв, не пройденных пожаром (фон) и кластеров пирогенных почв:

а – содержание общего углерода и гумусовых компонентов; б – фракционный состав гуминовых кислот; в – фракционный состав фульвокислот

Результаты канонического анализа кластеров пирогенных эвтрофных почв

Статистический показатель	Оценка значимости корня	Коэффициент канонических переменных		
		переменный	стандартизованный	факторной структуры
Собственное значение	196	ГК-1	-2,19	0,03
Каноническая корреляция, <i>R</i>	0,99	ГК-2	2,13	0,14
Лямбда Уилкса	0,005	ГК-3	-0,19	0,03
χ^2 -критерий	39,6	ФК-1а	0,65	0,02
<i>p</i> -уровень значимости	<0,0001	ФК-1	-3,98	-0,22
Доля объясненной дисперсии	1	ФК-2	-3,77	0,16
		ФК-3	-0,55	-0,09
		Гемицеллюлозы	0,79	-0,01
		Целлюлоза	-0,30	0

фракция наиболее восстановленных соединений в системе гумусовых веществ торфяных почв (рис. 4, б, в). Специфичность воздействия очагового подземного тления – повышенный выход фульвокислот 1-й фракции, преимущественно свободных и/или рыхло связанных с R_2O_3 , открытого пожара – активное образование гуминовых и фульвокислот, связанных с кальцием.

Очередная задача – выявление признаков, которые объективно вносят наибольший вклад или “вес” в разделение выделенных кластеров. Применили канонический анализ, который определяет канонический корень (дискриминантную функцию), т. е. некую “скрытую” переменную, объясняющую долю изменчивости между двумя наборами переменных, в нашем случае – кластерами пирогенных почв и групповым и фракционным составом данных группировок. Выделен один высокозначимый канонический корень со 100%-й долей объясненной дисперсии (табл. 7). В соответствии с абсолютными величинами стандартизованных коэффициентов наибольший вклад в каноническую функцию совокупно вносят 1-я и 2-я фракции гуминовых и фульвокислот. Персональный вклад каждой переменной оценили коэффициентами факторной структуры, согласно которым максимальный вес в дискриминацию кластеров вносят ГК-2, ФК-1 и ФК-2.

Роль временного фактора в гумусообразовании. Мету и скорость преобразования органического вещества нельзя рассматривать

вне времени и условий, в которых они осуществляются [Орлов, 1990]. Сравнивая гумусное состояние слоя 0–30 см эвтрофных почв за 20-летний послепожарный период с данными по составу органического вещества пирогенных олиготрофных и мезотрофных пластов, погребенных на глубину 30–100 см [Ефремова, Ефремов, 2006], находим как общие признаки влияния пожара, так и отличительные. Сходные: уникальное, не свойственное торфам в естественных условиях свойство пластичности, активизация процессов гумификации, потери веществ углеродной природы, а также нерастворимого и негидролизуемого остатка. Различия: в поверхностных горизонтах эвтрофных торфов – активная потеря углерода и накопление фульвокислот, в погребенных олиготрофных и мезотрофных пластах – концентрация углерода и гуминовых кислот, которые в большей мере по сравнению с фульвокислотами отвечают восстановленному характеру вещества. Это связано с тем, что в торфяных почвах процессы гумификации регулируются в значительной степени окислительно-восстановительной обстановкой. В ходе торфогенеза по мере захоронения почв усиливается анаэробизис, определяя общие закономерности гумусообразования в болотных экосистемах – концентрацию наиболее восстановленных продуктов в нижних слоях торфяной залежи [Ефремова, 1992]. Установлено, что за последний почти тысячелетний период линейная скорость прироста

торфа в ельниках заболоченных речных долин восточного макросклона Кузнецкого Алатау составила в среднем 1,12 мм/год [Ефремова и др., 2018]. На этом основании можно прогнозировать трансформацию фульватного гумуса торфяных почв и глееземов торфянистых в фульватно-гуматный и/или гуматный примерно через 270 лет по мере нарастания анаэробизиса в процессе погребения верхнего пирогенного слоя 30 см.

ВЫВОДЫ

1. Спустя 20 лет после лесоторфяного пожара пирогенные почвы (0–30 см) на площади пожарища характеризуются высоким содержанием гумусовых веществ ($\Sigma \text{ГК} + \Sigma \text{ФК}$ – округленно 54 % к $C_{\text{общ}}$) и фульватным типом гумуса ($C_{\text{ГК}}/C_{\text{ФК}} = 0,2\text{--}0,6$). Состав органического вещества сильно варьирует (C_v в основном $>25\%$). По результатам факторного анализа, вариация на 76 % определяется изменением группового и фракционного состава гумусовых компонентов.

2. Особенности огневого воздействия проявляются главным образом на фракционном уровне. Тление торфяного субстрата (ниже точки возгорания) обуславливает активный, в 3 раза, рост свободных фульвокислот фракции ФК-1 по сравнению с фоном (4,5 %). Открытый пожар вызывает резкое повышение гумусовых веществ 2-й фракции, связанных с кальцием: ГК-2 – в 8 раз (0,6 %), ФК-2 – в 4 раза (2,9 %). Определенный порог термической устойчивости проявляют наиболее восстановленные продукты гумификации 3-й фракции: относительно фона – ГК-3 (3,4 %) и ФК-3 (5,6 %) – их количество независимо от характера теплового воздействия возрастает примерно вдвое. Гуминовые кислоты ГК-1 слабее других фракций реагируют на термическое воздействие.

3. По составу органического вещества процедура кластерного анализа выделила на площади пожарища две группировки почв, статистическая достоверность которых подтверждена дискриминантным анализом. Кластеры почв, в том числе и морфолого-генетическому облику, соответствуют особенностям протекания пирогенных процессов – подземному очаговому тлению (слабое и умеренное тепловое воздействие) и откры-

тому пожару интенсивной и средней силы. В дискриминацию кластеров, согласно стандартизованным коэффициентам канонического анализа, наибольший совокупный вклад вносят 1-я и 2-я фракции гуминовых и фульвокислот, максимальный персональный – ГК-2, ФК-1 и ФК-2.

4. Продолжающееся на площади пожарища торфонакопление и погребение пирогенных пластов может вызвать в ходе диагенеза преобразование фульватного гумуса в фульватно-гуматный и/или гуматный (допущение на основе итогов ранее изученного нами гумусного состояния погребенных пирогенных торфов). Исходя из линейной скорости прироста торфа в ельниках заболоченных долин Кузнецкого Алатау (в среднем 1,12 мм/год), такие изменения в слое 0–30 см могут произойти примерно через 270 лет.

5. Выявленные различия в гумусном состоянии пирогенных почв, пройденных огнем различной интенсивности, показали возможность их использования в качестве одного из индикаторов, фиксирующих этапы трансформации органического вещества торфяного субстрата. Эти разработки вносят вклад в развитие экологического направления учения о гумусе почв и подтверждают правомерность традиционного деления на фракции гумусовых кислот.

Исследования выполнены в рамках базового проекта Института леса им. В. Н. Сукачева СО РАН “Функционально-динамическая индикация биоразнообразия лесов Сибири” № 0287-2021-0009.

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Аринушкина Е. В. Руководство по химическому анализу почв. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1970. 487 с.
- Глухова Т. В., Сирин А. А. Потери почвенного углерода при пожаре на осушенном лесном верховом болоте // Почвоведение. 2018. № 5. С. 580–588. doi: 10.7868/S0032180X18050076 [Glukhova T. V., Sirin A. A. Losses of Soil Carbon upon a Fire on a Drained Forested Raised Bog // Eur. Soil Sci. 2018. Vol. 51, N 5. P. 542–549. doi: 10.1134/S1064229318050034].
- Дергачева М. И. Традиции и новаторство в учении о гумусе почв // Почвы и окружающая среда, 2021. Т. 4, № 4. e172. <https://doi.org/10.31251/pos.v4i4.172>
- Ефремова Т. Т. Формирование почв при естественном облесении осушенных болот. Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1975. 126 с.
- Ефремова Т. Т. Почвообразование и диагностика торфяных почв болотных экосистем // Почвоведение. 1992. № 12. С. 25–35.

- Ефремова Т. Т., Ефремов С. П. Пирогенная трансформация органического вещества почв лесных болот // Почвоведение. 2006. № 12. С. 1441–1450. [Efremova T. T., Efremov S. P. Pyrogenic transformation of organic matter in soils of forest bogs // Eur. Soil Sci. 2006. Vol. 39, N 12. P. 1297–1305. doi: 10.1134/S1064229306120039].
- Ефремова Т. Т., Аврова А. Ф., Ефремов С. П. Пространственная дифференциация содержания углерода в торфяных почвах болотных ельников восточного макросклона Кузнецкого Алатау // Лесоведение. 2018. № 4. С. 273–284. doi: 10.1134/S002411481804006X
- Ефремова Т. Т., Пименов А. В., Ефремов С. П., Аврова А. Ф. Лесные пирогенные торфяные почвы и глееземы заболоченных горных долин юга Енисейской Сибири // Почвоведение. 2021. № 7. С. 771–782. doi: 10.31857/S0032180X21070030 [Efremova T. T., Pimenov A. V., Efremov S. P., Avrova A. F. Forest pyrogenic peat soils and gleyzems in swampy mountain valleys in the South of Yenisei Siberia // Eur. Soil Sci. 2021. Vol. 54, N 7. P. 975–985. doi: 10.1134/S1064229321070036].
- Заварзин Г. А., Колотилова Н. Н. Введение в природоведческую микробиологию. М.: Книжный дом “Университет”, 2001. 256 с.
- Заварзина А. Г., Данченко Н. Н., Демин В. В., Артемьева З. С., Когут Б. М. Гуминовые вещества – гипотезы и реальность (обзор) // Почвоведение. 2021. № 12. С. 1449–1481. doi:10.31857/S0032180X21120169 [Zavarzina A. G., Danchenko N. N., Demin V. V., Artemyeva Z. S., Kogut B. M. Humic substances: hypotheses and reality (a review) // Eur. Soil Sci. 2021. Vol. 54, N 12. P. 1826–1854. doi: 10.1134/S1064229321120164].
- Качинский Н. А. Физика почвы. М.: Высш. школа, 1965. 323 с.
- Ким Дж.-О., Мьюллер Ч. У., Клекка У. Р., Олдендерфер М. С., Блэшфилд Р. К. Факторный, дискриминантный и кластерный анализ. М.: Финансы и статистика, 1989. 215 с.
- Классификация и диагностика почв России. Смоленск: Ойкумена, 2004. 342 с.
- Классификация почв России. М.: Почв. ин-т им. В. В. Докучаева РАСХН, 2000. 235 с.
- Минаева Т. Ю., Сирин А. А. Биологическое разнообразие болот и изменение климата // Успехи соврем. биологии. 2011. Т. 131, № 4. С. 393–406.
- Мировая реферативная база почвенных ресурсов 2014. Международная система почвенной классификации для диагностики почв и создания легенд почвенных карт. Исправленная и дополненная версия 2015. М.: ФАО и МГУ, 2017. 203 с.
- Орлов Д. С. Гумусовые кислоты почв и общая теория гумификации. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1990. 325 с.
- Орлов Д. С., Бирюкова О. Н., Розанова М. С. Дополнительные показатели гумусного состояния почв и их генетических горизонтов // Почвоведение. 2004. № 8. С. 918–926.
- Пономарева В. В., Николаева Т. А. К методике изучения органического вещества в торфяно-болотных почвах // Современные почвенные процессы в лесной зоне европейской части СССР. М.: Изд-во АН СССР, 1959. С. 170–203.
- Пономарева В. В., Николаева Т. А. Гумус и почвообразование (методы и результаты изучения). Л.: Наука. Ленингр. отд-ние, 1980. 222 с.
- Раковский В. Е., Пигулевская Л. В. Химия и генезис торфа. М.: Недра, 1978. 230 с.
- Раковский В. Е., Каганович Ф. Л., Новичкова Е. А. Химия пирогенных процессов. Минск: Изд-во АН БССР, 1959. 208 с.
- 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: 10.1134/S0024114819050097
- Халафян А. А. STATISTICA 6. Статистический анализ данных: учебник. 3-е изд. М.: ООО “Бином-Пресс”, 2007. 515 с.
- Benscoter B. W., Greenacre D., Turetsky M. R. Wildfire as a key determinant of peatland microtopography // Can. J. Forest Res. 2015. Vol. 45, N 8. P. 1132–1136. https://doi.org/10.1139/cjfr-2015-0028
- Dyrness C. T., Norum R. A. The effects of experimental fires on black spruce forest floors in interior Alaska // Can. J. Forest Res. 1983. Vol. 13. P. 879–893.
- Hu Y., Fernandez-Anez N., Smith T. E. L., Rein G. Review of emissions from smouldering peat fires and their contribution to haze episodes // Int. J. Wildland Fire. 2018. Vol. 27. P. 293–312. http://doi.org/10.1071/WF17084
- Huang X., Rein G. Downward spread of smouldering peat fire: the role of moisture, density and oxygen supply // Int. J. Wildland Fire. 2017. Vol. 26. P. 907–918. https://doi.org/10.1071/WF16198
- 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. A. Bonn, T. Allott, M. Evans, H. Joosten, R. Stoneman. Cambridge University Press, 2016. P. 66–79. http://doi.org/10.1017/CBO9781139177788
- Pitkärnen A., Turunen J., Tolonen K. The role of fire in the carbon dynamics of a mire eastern Finland // Holocene. 1999. Vol. 9. P. 453–462.
- 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, N 6. P. D06301. doi: 10.1029/2005JD006455
- Sacamoto Kazunori, Voshida Tomia, Satoh Masaki. Comparison of carbon and nitrogen mineralization between fumigation and heating treatment // Soil Sci. Plant Nutr. 1992. Vol. 38, N 1. P. 133–140.
- Turetsky M. R., Wieder R. K. A direct approach to quantifying organic matter loss as a result of peatland wildfire // Can. J. Forest Res. 2001. Vol. 31. P. 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 // Nat. Geosci. 2015. Vol. 8, N 1. P. 11–14. http://doi.org/10.1038/NGEO2325
- Wieder R. K., Scott K. D., Kamminga K. K., Vile M. A., Vitt D. H., Bone T., Xu B., Benscoter B. W., Bhatti J. S. Postfire carbon balance in boreal bogs of Alberta, Canada // Glob. Change Biol. 2009. Vol. 15. P. 63–81.

Transformation of soil organic matter in connection with the intensity of peat fire (on the example of the swamp spruce forest of the Kuznetsk Alatau)

T. T. EFREMOVA, A. V. PIMENOV, S. P. EFREMOV, A. F. AVROVA

*Sukachev Institute of Forest (department of FIC KSC SB RAS)
Siberian Branch Russian Academy of Sciences
660036, Krasnoyarsk, Akademgorodok, 50/28
E-mail: efr2@ksc.krasn.ru*

ANNOTATION

Within the ecological direction of studying humus using traditional methods and terms, the peculiarities of the transformation of organic matter of peat eutrophic soils (Hypereutric Sapric Histosols) and peaty gleezems (Eutric Histic Gleysols) 20 years after a forest-peat fire are discussed. The object of the study was the green moss-hypnum spruce forests (*Picea obovata* Ledeb.) of eastern slope of the Kuznetsk Alatau (absolute height 622 m). The composition of organic matter of pyrogenic soils (0–30 cm) is characterized by high variability (coefficient of variation 12–92 %). According to the factor analysis, 76 % of the total variance is due to a combination of humic substances, 24 % – polysaccharides. Using the cluster analysis procedure, we identified two groups of objects whose statistical reliability was confirmed by discriminant analysis. Soil clusters reflect the peculiarities of pyrogenic processes – underground focal smoldering, below the point of ignition, and open intense and medium strength fire. Relative to the background carbon content of 41 % (peats not covered by fire), its amount decreases to 26.5 and 13.4 %, respectively. At the same time, there is an almost equal formation of humification products ($\Sigma GC + \Sigma FC$) – 55.4 and 53.7 % due mainly to fulvic acids (C_{gc}/C_{fc} 0.2–0.6). The peculiarities of the thermal effect are occurred mainly at the fractional level. The specificity of underground smoldering is an increased yield of fulvic acids of the first fraction, free and loosely bound to R_2O_3 . An open fire is accompanied by the predominant formation of humic and fulvic acids associated with calcium. According to standardized coefficients of canonical analysis, the first and second fractions of humic and fulvic acids make the greatest cumulative contribution to cluster discrimination, the maximum personal weight is HC-2, FC-1 and FC-2. Based on previously obtained information about the group composition of buried peats and the important role of anaerobiosis in the formation of humic acids, which are more correspond with the restored nature of the substance compared to fulvic acids, it can be assumed that peat genesis continuing in the area of the fire can cause the transformation of fulvate humus into fulvate-humate and/or humate. In the case of burial of a pyrogenic peat layer of 0–30 cm, this can happen in about 270 years, based on the rate of linear growth of peat in the spruce forests of the Kuznetsk Alatau – 1.12 mm/ year. The research results confirm the validity of the traditional division of humic acids into fractions.

Key words: humic acids, fulvic acids, fractional composition, pyrogenesis, soil clusters, underground focal smoldering, open fire, multivariate statistical analysis.