

ГЕНЕЗИС И ГЕОГРАФИЯ ПОЧВ

УДК 634.445.124+631.44.06+630.43

ЛЕСНЫЕ ПИРОГЕННЫЕ ТОРФЯНЫЕ ПОЧВЫ И ГЛЕЕЗЕМЫ ЗАБОЛОЧЕННЫХ ГОРНЫХ ДОЛИН ЮГА ЕНИСЕЙСКОЙ СИБИРИ

© 2021 г. Т. Т. Ефремова^а, *, А. В. Пименов^а, С. П. Ефремов^а, А. Ф. Аврова^а

^аИнститут леса им. В.Н. Сукачева СО РАН, Обособленное подразделение ФИЦ КНЦ СО РАН,
Академгородок, 50/28, Красноярск, 660036 Россия

*e-mail: efr2@ksc.krasn.ru

Поступила в редакцию 10.06.2020 г.

После доработки 12.12.2020 г.

Принята к публикации 28.12.2020 г.

На примере ельника заболоченной долины Кузнецкого Алатау (абсолютная высота 622 м) изучено различие торфяных эвтрофных почв (Hypereutric Sapric Histosols) и глееземов торфянистых (Eutric Histic Gleysols) через 20 лет после лесо-торфяного пожара. Почвы с сохранившимися от выгорания торфянистыми горизонтами характеризуются высокой вариабельностью свойств (C_v 25–33%). Зольность изменяется в интервале 23–81%, величина рН 5.8–8.2, плотность 0.09–0.49 г/см³, содержание органического углерода 7–37%, объемная влажность 31–85%. Статистически обосновано выделение четырех группировок пирогенных почв. Максимальными возможностями различать кластеры обладает показатель содержания органического углерода (93%). Значительно меньшая доля различия обеспечивается объемной влажностью (6%). Кластеры пирогенных почв, идентифицированные как торфяные, глееземы торфянистые, глееземы мелкоторфянистые и деструктивные, составляют почвенную комбинацию пожарища. Получена новая информация об убыли углерода в пирогенном субстрате, уточняющая сведения о потерях углерода, которые оцениваются в основном по глубине прогорания торфяной толщи. Величина потерь в слое 0–20 см в зависимости от интенсивности пирогенного воздействия составляет 0.4–6.3 кг С/м², что эквивалентно выбросам в атмосферу CO₂ от 1.4 до 23 кг/м².

Ключевые слова: потери углерода, кластеры почв, многомерный статистический анализ, лесо-торфяные пожары, пассивное тление

DOI: 10.31857/S0032180X21070030

ВВЕДЕНИЕ

Проблема глобального экологического кризиса – это не только загрязнение окружающей среды, но и разрушение естественных экосистем в результате хозяйственной деятельности человека и воздействия экзогенных факторов абиотического характера [22]. Мощным внешним фактором влияния на болотные экосистемы являются лесо-торфяные пожары.

Лесные болота с высоко полнотными древостоями, хотя и с меньшей частотой, чем суходольные, подвержены циклическому воздействию пожаров [8, 19, 28, 31]. Эвтрофные болота, как правило, безлесные и более обводненные менее предрасположены к пожарам, которые могут развиваться лишь на дренированных полосах вдоль речек. Опасность возгорания создается, когда уровень стояния поверхностных вод на болотах опускается ниже 50 см, влагосодержание торфа достигает критических значений 200%, а осадки за пожарный сезон составляют 60–80% от средних многолетних данных. С показателями пожарной погоды установ-

лена также временная последовательность горения торфяников Западной Канады [44].

Спонтанные пирогенные процессы на болотах имеют важное по своей экологической сути значение, но их оценка неоднозначна. Установлен мелиоративный эффект на лесных болотах преимущественно олиготрофного и олиго-мезотрофного ряда развития [3, 7, 12, 18, 25, 43]. На осушенных болотах даже несильные низовые пожары вызывают катастрофические последствия для древостоев [4]. Является также проблематичным использование глубоко деградированных пирогенно-преобразованных осушенных торфяников в земледелии без радикальной рекультивации [5, 13, 14, 20].

Возрастающее понимание роли парниковых газов в изменении глобального климата, в том числе в связи с эмиссией CO и CO₂ при пожарах, вызвала необходимость более широкого и пристального изучения потерь органического углерода при возгорании болот. Показано, что наибольшее количество сгораемого органического вещества в расче-

тах на единицу площади приходится на почвенные (подземные) пожары, обозначены сложности исчисления убыли углерода и предложены косвенные методы оценки его потерь, отмечен недостаток натурных данных особенно в таежной зоне и нашей стране [6, 11, 27, 36, 38, 39, 42, 45, 46].

Особенностью горения лесных и торфяных пожаров является их высокая мозаичность и рассредоточенность в пространстве [23, 35, 40, 41]. Однако сведений о пространственной неоднородности пироторфяных рядов почв, связанных с силой пожара, немного. Показано, что пожар на олиготрофном болоте о. Сахалин сопровождался формированием неоднородности почвенного покрова с участием олиготрофных торфяных, олиготрофных торфяно-глеевых и их пирогенных подтипов [21]. Пространственные комбинации самих пирогенных почв в указанной публикации не рассматриваются.

Пожары на болотах в силу присутствия избыточных горизонтов сопровождаются химическим и механическим недожогом. Он выражает долю торфяного субстрата, не участвующего по каким-либо причинам в горении, которому сопутствуют процессы распада органического вещества торфа с участием воды [2, 26]. Между тем, в пирогенном субстрате потери углерода, как правило, не рассматриваются.

Итак, в текущее время наименее изученными остаются пирогенные эвтрофные почвы лесных болот. Не уделяется должного внимания степени различия их свойств, которое обусловлено большим рассредоточением лесных пожаров по площади горения. Практически не рассматриваются потери органического углерода в составе механического и химического недожого.

Цель работы – выявить пространственную неоднородность свойств торфяных эвтрофных почв и глееземов торфянистых вследствие лесоторфяного пожара и оценить потери органического углерода в постпирогенном материале (механический и химический недожог).

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Изучали торфяные эвтрофные почвы и глееземы торфянистые (Hypereutric Sapric Histosols, Eutric Histic Gleysols) восточного макросклона Кузнецкого Алатау [17, 24], пройденные пожаром. По классификации [17] – пирогенный подтип почв. Торфяные болота формируются неширокой, довольно протяженной полосой по узким горным ущельям, долинам рек, ручьев и речек с устойчивым мерзлотно-торфяным водоупором. Болота питаются подземными водами, надмерзлотной верховодкой, аллювиальными и делювиальными потоками. Заболоченные долины по-

крыты в основном ельниками преимущественно гипново-зеленомошной группы типов леса.

Непосредственным объектом исследования послужил торфяной массив (1.8 тыс. га) в долине реки Тунгжуль (622 м над ур. м.). Заболоченная долина занята разновозрастным зеленомошно-гипновым ельником (*Picea obovata* Ledeb.) Va класса бонитета. Степень проективного покрытия мхами составляет 95%. Сухой весной 1999 г. площадь более 200 га пройдена крупным лесоторфяным пожаром вблизи деревни Усть-Тунгжуль (Республика Хакасия). Ко времени обследования в сентябре 2018 г., то есть спустя 20 лет, болото представляло собой труднопроходимую территорию, занятую густым березняком (*Betula pubescens* Ehrh.) кустарниковым осоково-зеленомошным, относящимся к группе кратковременно-производных постпирогенных травяных лесов. Флористический состав на 87% слагается сосудистыми растениями. Возраст березняков – 17–20 лет соответствует послепожарному периоду. Поверхность гари имеет хорошо выраженный микрорельеф в виде пестрой мозаики понижений, мочажин и возвышений из кочек осок, мхов и скоплений валежника.

Эколого-пирологическую трансекту заложили вдоль русла реки на расстоянии 25–35 м от берегового вала (географические координаты 54°14'24.70" N, 89°35'59.40" E – 54°14'30.60" N, 89°36'03.10" E) и разбили на 5 пробных площадей, удаленных друг от друга примерно на 50–60 м (рис. 1). На каждой, сообразно доминирующему напочвенному покрову, выделили по 2 участка, в пределах которых заложили почвенные разрезы по элементам микрорельефа – мочажина (М), повышение (П). В данном сообщении обсуждаются результаты влияния термического воздействия на мочажинные как доминирующие элементы микрорельефа гари. Увеличение доли отрицательных форм микрорельефа вследствие пожара установлено также в бореальных торфяниках за 100-летнюю сукцессионную хроносеквенцию [33, 34].

Интенсивность воздействия пожара на торфяную почву оценивали косвенно. Руководствовались преимущественно: а) особенностями морфолого-генетического строения почвенного профиля – мощностью невыгоревшего торфяного субстрата, сохранностью подстилки и ее мощностью, б) разнообразием непосредственных признаков пожара – углей, прослойки пирогенной золы, углистых примазок, степенью пластичности (липкости) торфа. По данным признакам в пределах полигона выделено (условно) слабое, умеренное, среднее и интенсивное воздействие пожара на торфяную залежь.

Почвы с торфянистыми горизонтами отбирали в виде монолитов 35 × 35 × 40 см по элементам микрорельефа в четырех повторностях. Химический анализ проведен в образцах преимуще-

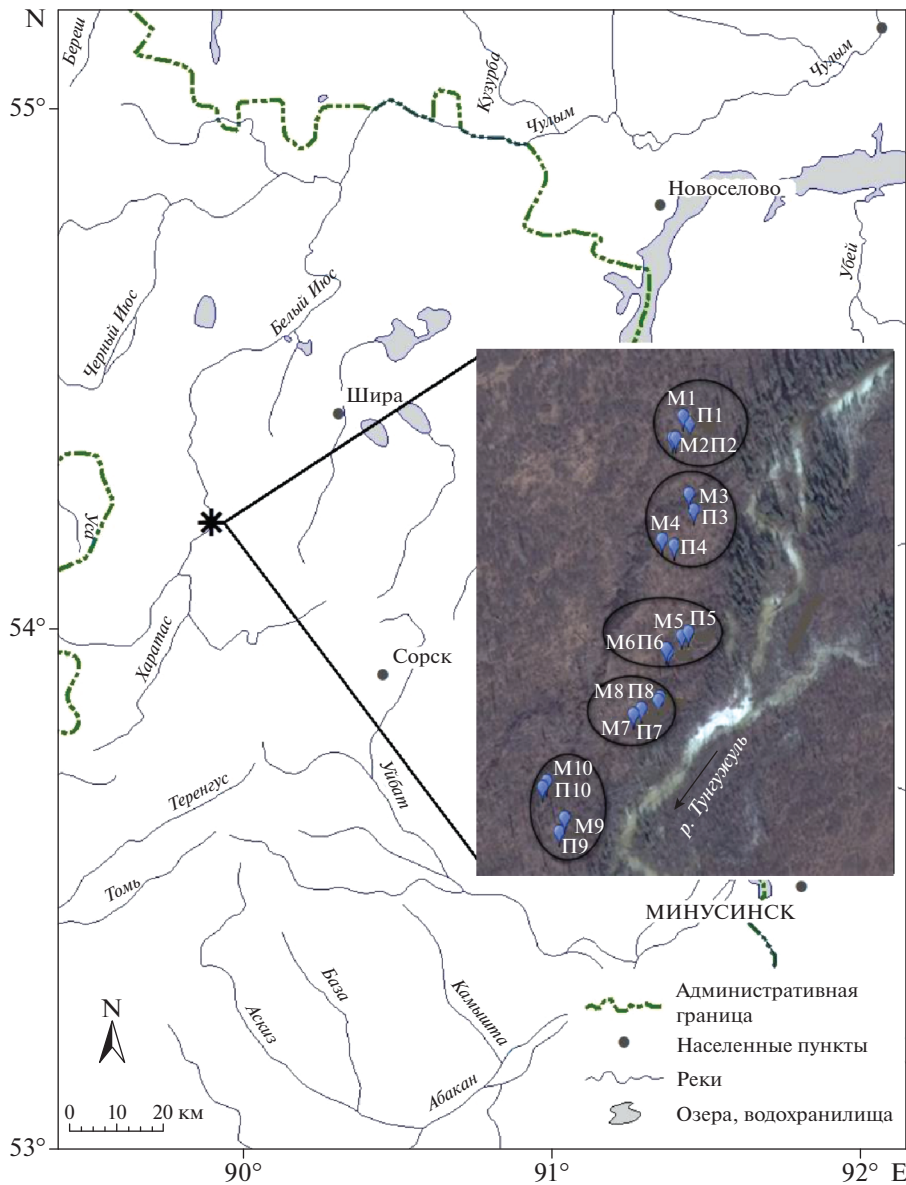


Рис. 1. Карта-схема района исследований лесных пирогенных почв и размещение участков (пробных площадей) эколого-пирологической трансекты на зимнем космическом снимке. Условные обозначения: окружности – пробные площади, цифры – номера участков, П – микроповышение, М – мочажина.

ственно из корнеобитаемой зоны (0–20 см). Зольность торфа определяли сжиганием в муфельной печи при температуре 850°C, величина рН – потенциометрически, плотность почвы – методом режущего кольца [1]. Содержание углерода определяли на элементном анализаторе FLASHTM1112 (производитель Thermo Quest Italia). Пластичность торфяного субстрата оценивали, пользуясь рекомендациями Качинского [15]. Многомерный статистический анализ выполнен в программе EXCEL и STATISTICA 6 по руководству [32].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Содержание углерода и физико-химические показатели пирогенных торфяных почв и глеезёмов торфянистых характеризуются в географических координатах эколого-пирологической трансекты.

Количество углерода в почвах фитогенных микропонижений участков (индекс М) эколого-пирологической трансекты значительно варьирует (табл. 1) и образует следующий нисходящий ряд: М-9_{32,2} > М-2_{25,5} ≈ М-1 ≈ М-3 > М-8₁₉ ≈ М-5 ≈ М-6 ≈ М-4 > М-7_{13,3} = М-10 (нижний индекс, С%).

Таблица 1. Статистическая оценка физико-химических свойств и содержания углерода в пирогенных почвах эколого-пирологической трансекты

Статистические показатели	Номера участков										В целом по трансекте
	М-1	М-2	М-3	М-4	М-5	М-6	М-7	М-8	М-9	М-10	
Углерод, %											
Среднее (<i>x</i>)	23.8	25.5	22.1	18.1	18.3	18.4	13.4	19.0	32.2	13.3	20.5
<i>m</i> _x	3.4	2.6	2.2	1.3	1.4	1.5	2.3	1.7	1.2	2.6	1.1
Медиана	21.1	23.2	19.8	16.8	18.8	18.9	11.9	19.5	32.1	11.8	19.6
Минимум	16.0	20.4	16.7	15.3	13.7	13.8	8.2	14.1	28.8	7.1	7.1
Максимум	33.8	33.9	29.1	22.9	21.2	23.8	20.1	23.5	36.7	21.4	36.7
<i>C</i> _v , %	28	21	20	15	15	16	32	18	7	39	33
Активная кислотность, рН _{H₂O}											
Среднее (<i>x</i>)	7.4	6.5	7.0	7.1	7.6	7.3	7.9	7.4	6.9	7.9	7.3
<i>m</i> _x	0.1	0.2	0.1	0.1	0.0	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.05
Медиана	7.5	6.6	7.1	7.1	7.7	7.2	8.1	7.3	6.8	8.1	7.3
Мода	7.7	7.2	7.0	7.4	7.7	7.2	8.2	7.3	6.8	8.2	7.2
Минимум	6.9	5.8	6.2	6.9	7.5	6.7	7.5	7.2	6.5	7.4	5.8
Максимум	7.7	7.2	7.5	7.5	7.8	7.9	8.2	7.7	7.2	8.2	8.2
<i>C</i> _v , %	4	8	7	3	1	7	4	3	3	4	7
Объемная влажность, %											
Среднее (<i>x</i>)	52.0	65.7	71.5	56.7	75.8	67.9	73.7	65.8	38.5	40.7	60.8
<i>m</i> _x	12.0	5.5	2.8	3.9	5.5	0.9	3.9	3.6	4.4	5.4	8.7
Медиана	51.3	68.9	73.1	55.0	75.5	67.3	75.4	68.0	34.8	38.2	66.3
Минимум	31.5	55.0	66.0	51.0	66.4	66.7	66.3	58.8	33.5	32.9	31.5
Максимум	73.1	73.2	75.2	64.2	85.4	69.8	79.3	70.6	47.3	51.1	85.4
<i>C</i> _v , %	40	14	7	12	13	2	9	9	20	23	25
Зольность, %											
Среднее (<i>x</i>)	47.5	44.4	50.9	58.3	57.9	57.7	68.4	56.7	31.6	67.3	54.1
<i>m</i> _x	3.7	2.9	2.4	1.4	1.5	1.6	2.5	1.9	1.3	2.8	1.2
Медиана	52.6	48.7	55.0	60.8	57.0	56.9	70.1	55.7	31.8	70.2	55.5
Минимум	28.6	28.5	37.4	49.2	52.5	47.5	54.6	48.1	23.1	52.1	23.1
Максимум	62.3	54.0	60.9	63.7	66.7	66.5	81.4	65.9	38.1	79.1	81.4
<i>C</i> _v , %	27	22	17	9	9	10	13	12	14	15	24
Плотность, г/см ³											
Среднее (<i>x</i>)	0.202	0.307	0.356	0.331	0.339	0.340	0.298	0.302	0.177	0.456	0.299
<i>m</i> _x	0.047	0.022	0.048	0.056	0.010	0.036	0.044	0.055	0.020	0.122	0.016
Медиана	0.201	0.301	0.352	0.297	0.334	0.342	0.277	0.262	0.168	0.438	0.277
Минимум	0.094	0.268	0.269	0.236	0.322	0.251	0.216	0.219	0.140	0.180	0.094
Максимум	0.310	0.358	0.449	0.494	0.368	0.424	0.423	0.465	0.230	0.768	0.494
<i>C</i> _v , %	47	14	27	34	6	21	30	37	23	53	33

Примечание. *m*_x – ошибка среднего арифметического; *C*_v, % – коэффициент вариации.

Содержание зольных веществ в пирогенных образованиях значительно (в 4.5 раза) превышает конституционное (12%) и прямо противоположно тренду углерода. Реакция среды изменяется в интервале от слабокислой (М-3, М-2, М-9) до

щелочной (М-7 и М-10). Максимальной плотностью сложения характеризуются пирогенные почвы участка М-10, наиболее низкой – М-9, остальные – относительно сходны между собой. Наибольший величиной объемной влажности

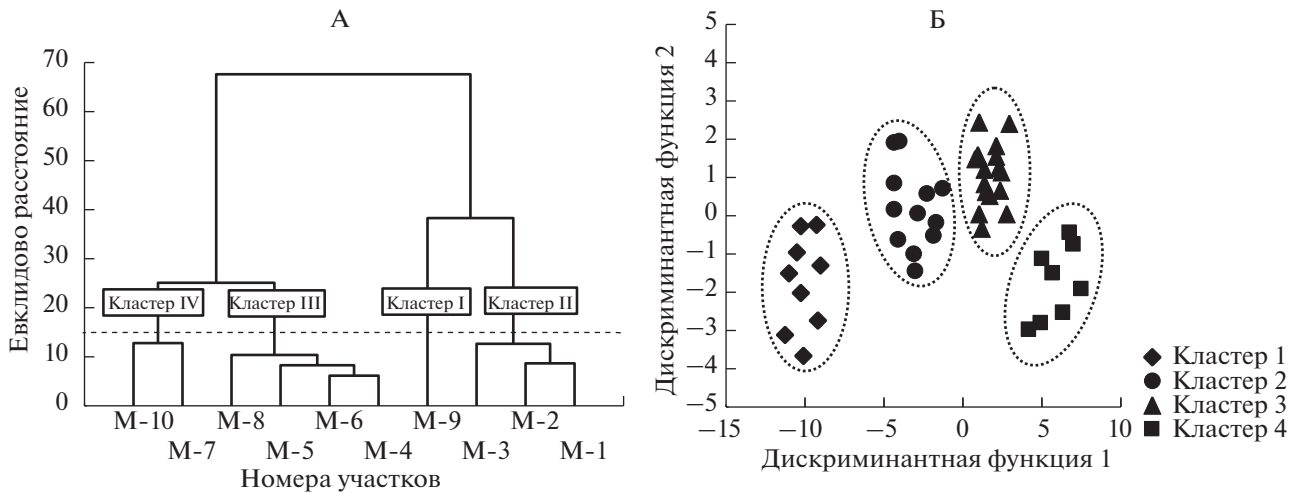


Рис. 2. Вертикальная древовидная кластеризация пирогенных почв по физико-химическим показателям (А), размещение кластеров на плоскости в многомерном пространстве признаков (Б).

отличается торфяной субстрат участков М-3, М-5 и М-7, наименьшей – М-9 и М-10.

Многомерный статистический анализ. Сильная изменчивость физико-химических показателей и содержания углерода обусловили целесообразность группировки пирогенных почв, которая позволит судить о глубине их преобразования в связи с интенсивностью теплового воздействия. Систематизацию выполнили методом кластерного анализа, используя всю совокупность полученных данных. Применили евклидово расстояние и метод полной связи. На дендрограмме четко обозначились 4 кластера (рис. 2, А). В самостоятельный выделились торфяные почвы участка М-9 – кластер I. Последовательно практически один за другим сгруппировались участки: (М-1 + М-2 + М-3) – кластер II, (М-4 + М-5 + М-6 + М-8) – кластер III, (М-7 + М-10) – кластер IV. Достоверность межгрупповых различий и персональный вклад физико-химических свойств в группировку пирогенных почв оценили с помощью дискри-

минантного анализа. Согласно квадратам расстояния Махаланобиса и *p*-уровню значимости, кластеры почв достоверно отличаются друг от друга и характеризуются 100% попаданием в соответствующую группу (табл. 2). Вне модели оказались показатели зольности и объемной массы. Содержание углерода, объемная влажность и актуальная кислотность, судя по *F*-критерию и лямбде Уилкса, лежащей около 0, способны значимо различать сформированные кластеры почв (табл. 3).

С помощью канонического корреляционного анализа находили зависимость между взвешенными суммами переменных из каждого множества: а) 4 кластера, б) дисперсии почвенных признаков (*n* = 120). Взвешенные суммы определяют канонический корень – каноническую дискриминантную функцию (каноническую переменную) как некую “скрытую” переменную, объясняющую долю изменчивости между двумя наборами переменных. Максимальное число оцениваемых функций равно числу переменных наименьшего

Таблица 2. Оценка межгрупповой дисперсии кластеров пирогенных почв методом дискриминантного анализа

Индекс кластера	Квадраты расстояний Махаланобиса, <i>p</i> -уровни значимости				Матрица классификации				
					% попадания	число попаданий			
	I	II	III	IV		I	II	III	IV
I	–	54.8	142.6	253.0	100	9	0	0	0
II	<0.001	–	22.2	81.7	100	0	12	0	0
III	<0.001	<0.001	–	26.3	100	0	0	16	0
IV	<0.001	<0.001	<0.001	–	100	0	0	0	8
Итоги классификации:					100	9	12	16	8

Таблица 3. Результаты пошагового дискриминантного анализа вклада переменных в группировку пирогенных почв

Переменные модели	Лямбда Уилкса	Частная лямбда	F-критерий	p-уровень	Толерантность (T)	R ² (1-T)
Качество модели: лямбда Уилкса – 0.029, F-критерий – 57.2, p-уровень <0.001						
Углерод, %	0.134	0.105	96.8	0.000	0.894	0.106
Объемная влажность, %	0.029	0.490	11.8	0.000	0.980	0.020
pH _{H2O}	0.019	0.729	4.2	0.012	0.910	0.090

Таблица 4. Результаты канонического анализа группировки пирогенных почв

Оценка значимости корней, переменные	Корень 1	Корень 2	Корень 3
Собственное значение	22.843	1.508	0.189
Каноническая корреляция, R	0.979	0.775	0.398
λ-статистика Уилкса	0.014	0.335	0.841
χ ² -критерий	151.36	38.77	6.13
p-уровень значимости	<0.001	<0.001	0.013
Доля объясненной дисперсии	0.93	0.06	0.01
Стандартизованные коэффициенты			
pH _{H2O}	0.012	-0.528	-0.905
Углерод	-1.00	-0.196	-0.2663
Объемная влажность	0.100	0.889	-0.468

подмножества минус единица [16]. В нашем случае оцениваются 3 канонических корня.

В первой строке табл. 4 величина и значимость χ²-критерия показывает значимость критерия для всех корней в целом, вторая – значимость для оставшихся корней после удаления первого корня и т. д. Как видим, все канонические корни являются значимыми (p-уровень <0.001). Согласно критерию Кайзера, нагрузки канонических факторов (корней) можно интерпретировать так же, как в факторном анализе, то есть к рассмотрению числа корней принимаются те, собственные значения которых больше 1 [16]. Поэтому корень 3 исключается из обсуждения.

О лучшем разграничении выделенных групп почв с торфяными горизонтами по корню 1 и 2 свидетельствует также статистика лямбда Уилкса, приближенная к нулю. Согласно стандартизованным коэффициентам, наибольший вклад в корень 1 вносит содержание углерода, в дискриминантную функцию 2 – объемная влажность (табл. 4). Доля объясненной дисперсии первого корня составляет 93%. Второй обеспечивает значительно меньшую долю различия 6%.

Диаграмма рассеяния нестандартизованных канонических коэффициентов для каждого наблюдения в координатах первых двух корней

позволяет определить и визуализировать кластеры, лучше всего идентифицируемые конкретной канонической функцией. Группировки пирогенных торфяных и торфяно-глеевых почв отчетливо разделяются дискриминантной функцией 1 (рис. 2, Б). Наиболее удалены друг от друга кластеры I (участок М-9) и IV (М-7 + М-10).

Морфолого-генетическое строение кластеров почв и их классификационная идентификация. Пирогенные почвы, испытавшие так называемый механический и химический недожог, характеризуются рядом общих морфологических признаков. Они содержат плотную, хорошо разложившуюся субстанцию с анатомически не различимыми растительными остатками, высокозольную, практически одинаковой темно-бурой окраски, очень влажную, обильно насыщенную живыми корнями в поверхностных слоях и за пределами ризосферы, пластичную, свободно скатывающуюся в гомогенную массу.

Кластер I характеризует почвенный профиль следующего строения: OLF-T1hq-T2hβ1-TT, где OLF, подстилка: L – листовая, F – ферментативный подгоризонты, T1-T2 – торфяные горизонты, h – перегнойный, хорошо разложившийся торф, q – творожистая структура, β1 – при скатывании торфа в кольцо шнур распадается, TT – органическая порода. Сохранившаяся среднемош-

ная торфянистая подстилка сложена стебельками и дериватами мхов, слабо инкрустированных древесным опадом. Следы пожара в виде тонкой прослойки (0,5–1 см) мелких углей с поверхности. Торфяной субстрат кореннасыщенной зоны 0–15(20) см сложен на 50–70% (от объема) непрочными зернистыми агрегатами гумусовой природы, ниже – слабовыраженная пластичность. Мощность торфяной толщи составляет 50–60 см и соответствует по классификации [17] пирогенным торфяным эвтрофным почвам.

Кластер II представляет пирогенные почвы следующего морфолого-генетического строения: OLF–T1hq–T2hβ2–TT, где β2 – кольцо не разрывается, но образует трещины. Торфяная залежь характеризуется маломощной торфянистой подстилкой. С поверхности небольшая прослойка (2–4 см) мелких углей, на глубине 2–12 см – сажистая примазка яркого черного цвета. Торфяной субстрат визуальнo агрегирован примерно на 50%, но при нарушении сложения полностью распадается на непрочные ореховато-зернистые макроагрегаты. В пределах 10–17 см четко выраженная пластичность торфа, глубже осязательный запах сероводорода. В зоне ризосферы на глубине 0–10(15) см почвенные животные-гумусообразователи: часто – энхитреиды, реже – дождевые черви. Мощность торфяного слоя колеблется в пределах 25–30 см, что соответствует пирогенным глееземам торфянистым.

Кластер III выражает пирогенные образования следующего морфолого-генетического строения: OLF–Thq–TRβ3–G, где TR – торфяно-минеральный горизонт, β3 – субстрат легко скатывается в сплошной шнур, образуя кольцо без трещин, G – оглеенный минеральный суглинок. Отличается слабо оформленной торфянистой подстилкой (≈1 см), меньшей мощностью торфяного слоя, ниже – органо-минеральный субстрат сизоватого оттенка. В большей части почвенного профиля включения мелких углей. Торф на 75–100% агрегирован непрочными ореховато-зернистыми отдельностями гумусовой природы. Органо-минеральный горизонт сильно пластичен. В зоне ризосферы часты энхитреиды, дождевые черви – спорадически. Мощность торфяного слоя колеблется от 14 до 18 см, что соответствует пирогенным глееземам мелкоторфянистым.

Кластер IV характеризует профиль пирогенных почв следующего строения: Tshn–TRβ3–G, где n – прочные ореховатые органо-минеральные структурные отдельности, s – пирогенная зола. Мощность собственно торфяного субстрата сокращена до 3 см. Ниже торфяно-минеральный горизонт серо-сизого оттенка с запахом сероводорода, агрегированный на 70–100% прочными органо-минеральными ореховатыми структурными отдельностями. По всему почвенному про-

филю следы пожара в виде углей, сажистой примазки ярко черного цвета. Прослойка золы охристо-серого цвета (≈2–3 см) зигзагообразной конфигурации в пределах 4–12 см. Почвенная масса очень пластичная. Редкая встречаемость энхитреид и дождевых червей. Почвы кластера IV на основании практически полного выгорания и оземления торфяного субстрата (зольность до 81%) прямо не предусмотрены классификацией [17], но условно могут быть отнесены к подтипу пирогенных деструктивных почв.

Таким образом, под воздействием лесо-торфяного пожара в болотном ельнике сформировался неоднородный почвенный покров, представленный сочетанием пирогенных торфяных, глееземов торфянистых и мелкоторфянистых, а также деструктивных почв. На опытном полигоне они чередуются в диапазоне расстояний 40–110 м, характеризуются высокой зольностью и степенью разложения торфа, то есть близкими лесорастительными свойствами и сходным уровнем плодородия. Такие оценки, на наш взгляд, соответствуют представлениям Фридланда [30] о такой почвенной комбинации, как пятнистость.

Состояние горючих растительных материалов при пожарах определяется особенностями протекания процесса [29]. В случае проникновения открытого огня глубже 9 см возникает подземный пожар. Он характеризуется скрытым горизонтальным распространением в направлении участков с повышенной влажностью торфа до критического негоримого состояния 300–500%. Горение обычно происходит в режиме “тления” (беспламенная фаза) как за счет атмосферного кислорода, так и кислорода восстановленных при термическом воздействии химических соединений водной фазы и торфяного субстрата. Так, осязательный запах сероводорода (H₂S) в горизонтах обсуждаемого торфяного массива – продукт восстановления сульфатов, в частности анионов (SO₄²⁻), содержание которых в почвенно-грунтовых водах отдельных участков обсуждаемого полигона достигала 760 мг/л.

На основании изложенного можно допустить, что торфяные почвы кластера I испытали влияние слабого лесо-торфяного пожара. Глееземы торфянистые и мелкоторфянистые (кластер II, III), наряду с частичным выгоранием, были в основном охвачены пассивным тлением в условиях умеренного и среднего термического воздействия при температуре ниже точки возгорания. Критической является температура 240–260°C: при ней начинается обугливание, приводящее к полному разложению целлюлозы [26]. Деструктивные почвы кластера IV пройдены сильным низовым пожаром. Эта рассредоточенность категорий пожара по площади лесного болота определялась целым рядом факторов: уровнем залегания грунтовых вод, нали-

Таблица 5. Физико-химические показатели кластеров пирогенных почв

Глубина горизонта, см	Углерод, %	рН _{H₂O}	Плотность, г/см ³	Зольность	Объемная влажность
				%	
Кластер I – пирогенные торфяные					
0–5	$\frac{30.5}{28.0-32.0}$	$\frac{6.6}{6.5-6.8}$	$\frac{0.183}{0.178-0.227}$	$\frac{34.8}{32.1-0.227}$	$\frac{33.6}{30.1-42.7}$
5–12	$\frac{35.0}{33.6-36.7}$	$\frac{6.8}{6.8-6.9}$	$\frac{0.153}{0.136-0.172}$	$\frac{26.5}{23.1-29.1}$	$\frac{34.8}{28.9-40.3}$
12–20	$\frac{31.2}{29.4-32.6}$	$\frac{7.2}{7.1-7.2}$	$\frac{0.185}{0.174-0.220}$	$\frac{33.6}{31.0-36.9}$	$\frac{47.3}{36.7-50.1}$
Кластер II – пирогенные глееземы торфянистые					
0–3	$\frac{30.9}{26.6-33.9}$	$\frac{6.4}{5.8-7.1}$	$\frac{0.215}{0.095-0.277}$	$\frac{34.1}{28.5-42.3}$	$\frac{53.2}{31.5-73.1}$
3–10	$\frac{21.3}{18.7-24.9}$	$\frac{7.0}{6.5-7.5}$	$\frac{0.315}{0.160-0.427}$	$\frac{52.3}{45.5-57.2}$	$\frac{66.6}{51.3-75.2}$
10–20	$\frac{19.1}{16.0-21.3}$	$\frac{7.4}{7.1-7.7}$	$\frac{0.311}{0.276-0.359}$	$\frac{56.4}{52.3-62.3}$	$\frac{69.4}{66.0-73.1}$
Кластер III – пирогенные глееземы мелкоторфянистые					
0–2	$\frac{20.8}{18.0-23.8}$	$\frac{7.1}{6.7-7.6}$	$\frac{0.284}{0.219-0.368}$	$\frac{53.2}{47.5-58.4}$	$\frac{67.1}{55.0-75.5}$
2–14	$\frac{19.2}{16.3-23.5}$	$\frac{7.3}{7.1-7.7}$	$\frac{0.284}{0.236-0.327}$	$\frac{56.2}{48.1-61.7}$	$\frac{63.0}{51.0-68.0}$
14–20	$\frac{15.3}{13.7-17.9}$	$\frac{7.7}{7.4-7.9}$	$\frac{0.372}{0.334-0.395}$	$\frac{63.6}{58.7-66.7}$	$\frac{69.5}{58.8-85.4}$
Кластер IV – пирогенные деструктивные					
0–3	$\frac{18.4}{14.9-21.4}$	$\frac{7.5}{7.4-7.7}$	$\frac{0.198}{0.180-0.216}$	$\frac{57.8}{52.1-64.3}$	$\frac{49.6}{32.9-66.3}$
3–12	$\frac{10.1}{8.2-20.1}$	$\frac{8.1}{7.9-8.2}$	$\frac{0.337}{0.277-0.396}$	$\frac{72.7}{54.6-81.4}$	$\frac{63.3}{51.1-75.4}$
12–20	$\frac{10.8}{7.8-12.7}$	$\frac{8.1}{8.1-8.2}$	$\frac{0.415}{0.350-0.480}$	$\frac{73.2}{68.5-77.7}$	$\frac{58.7}{38.2-79.3}$

Примечание. Над чертой – среднее, под чертой – пределы.

нием микрорельефа и мерзлого водоупора, разнообразием напочвенного покрова, неоднородностью состава древостоя, его полноты и т. д.

Содержание углерода и физико-химические свойства пирогенных почв. Независимо от интенсивности пожара в почвах с глубиной наблюдается четкое последовательное уменьшение содержания углерода. Процесс сопровождается увеличением зольности и активной кислотности (рН_{H₂O}), а также в той или иной мере возрастанием объемной массы и влажности торфа (табл. 5). Эти закономерности, согласно [29, 39], можно объяснить тем, что горение (обычно тление) протекает значительно интенсивнее в нижних слоях торфяной залежи. Сю-

да в большей мере поступает тяжелый (холодный) атмосферный воздух, который активно реагирует с горящим торфом. В верхнюю толщу возгоняются продукты пиролиза, а также углекислый и угарный газы, препятствуя доступу кислорода и уменьшая силу огневого воздействия.

Различная интенсивность лесо-торфяных пожаров проявляется главным образом на количественном уровне однонаправленного воздействия на свойства органогенных почв. Величину потерь углерода и глубину преобразования торфяного субстрата оценивали относительно фона. За фон приняли физико-химические свойства эвтрофных торфяных почв болотного ельника, не затро-

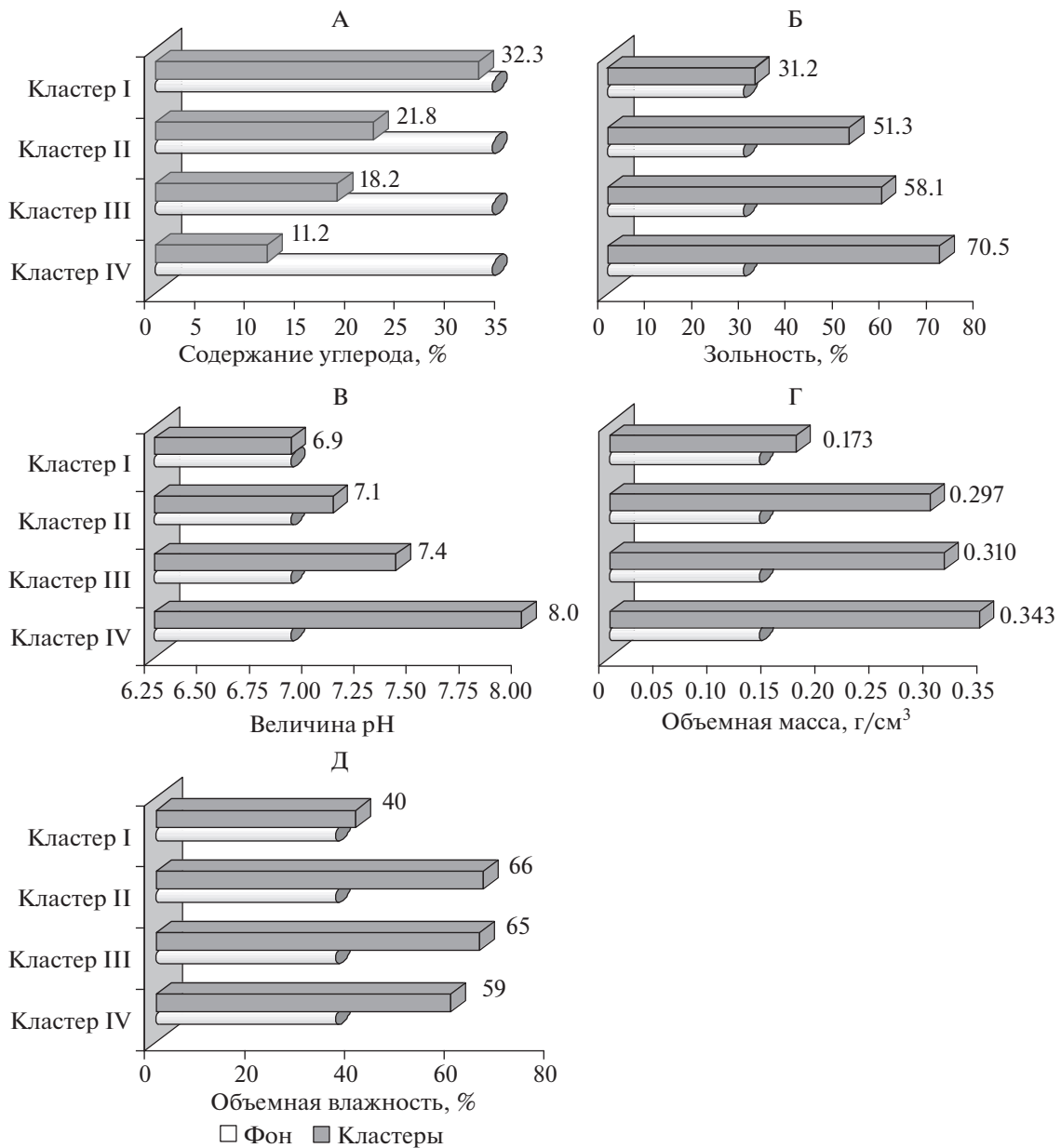


Рис. 3. Свойства сгруппированных пирогенных почв относительно фона. Условные обозначения: А – содержание углерода, Б – зольность, В – величина pH, Г – плотность, Д – объемная влажность. Классификационное название кластеров почв см. в тексте.

нутого пожаром (экспериментальный объект), который расположен в 4–5 км от гари вверх по руслу р. Тунгжувль. В слое торфа 0–20 см экспериментального объекта на расстоянии 24–36 м от русла, соответствующего местоположению эколого-пирологической трансекты, содержание углерода составляет 33.7%, величина pH – 6.9, зольность – 28.8%, плотность почвы 0.139 г/см³, объемная влажность – 36% [9].

Торфяные почвы кластера I, пройденные слабым огнем, отличаются наиболее высоким содер-

жанием углерода 32.3% (рис. 3, А). Тем не менее, это на 1.4% меньше, что равнозначно 4.2% потерь от фонового содержания. При термическом воздействии (условно) умеренной и средней силы в глееземах торфянистых и мелкоторфянистых (кластеры II и III) содержание углерода уменьшается на 11.9 и 15.5%, то есть убыль составляет 35 и 46% от фона. Интенсивный пожар приводит в деструктивных почвах кластера IV к сокращению количества углерода на 22.5% (в 3 раза), что характеризует 67% его потерь.

Потери углерода в слое 0–20 см в пересчете на единицу площади (m^2) торфяной залежи рассчитывали следующим образом:

$$C_w = [(C_{bg} - C_{pir})Hd]/10,$$

где C_w – потери углерода, kg/m^2 ; C_{bg} – фоновое содержание C , %; C_{pir} – содержание в пирогенных почвах C , %; H – мощность слоя, cm ; d – фоновая плотность почвы, g/cm^3 .

Величина добавочных потерь в зависимости от слабого, умеренного, среднего и сильного термического воздействия составила 0.4, 3.4, 4.2, 6.3 kg/m^2 и эквивалентна выбросам в атмосферу углекислого газа от 1.4 до 23 kg/m^2 соответственно.

Исходя из того, что потери углерода в основном оцениваются по глубине прогорания торфяной толщи, приведенные цифры – принципиально новая информация. Эти данные характеризуют дополнительную убыль углерода в процессе пассивного тления торфа – термического распада при участии воды как растворителя и химического агента, что вызывает довольно глубокие изменения и распад органического вещества даже при относительно низких температурах [26].

Содержание зольных компонентов в пирогенных почвах обнаруживает пропорционально противоположную углероду закономерность: в высокозольных торфах эти показатели отрицательно на 93% связаны между собой по типу линейной функции [10]. Сильный пожар сопровождается существенным повышением (в 2.5 раза) зольности торфа в деструктивных почвах кластера IV (рис. 3, Б). Значительно меньшее влияние оказывает слабый пожар. Условно среднее и умеренное термическое воздействие приводит к увеличению минеральных компонентов в глееземах торфянистых и мелкоторфянистых примерно в 2 раза (кластеры II и III). Аналогичные показатели зольности (57–83%) в эвтрофных пирогенных почвах показаны и другими авторами [20].

Количество минеральных веществ и величина рН в кластерах пирогенных почв тесно положительно детерминированы ($R^2 - 63\%$, $F - 65.5$, $p < 0.001$). В торфяных почвах (кластер I), слабо затронутых пожаром, величина рН соответствует нейтральной реакции среды (рис. 3, В). В торфянистых и мелкоторфянистых глееземах (кластеры II, III) в условиях умеренного и среднего теплового воздействия рН плавно смещается в слабощелочной интервал. В деструктивных почвах (кластер IV) вследствие сильного пожара реакции среды становится щелочной. Возгорание торфа приводит к высвобождению таких зольных элементов, как натрий, калий, кальций, магний [3, 43], которые, как известно, активно регулируют реакцию почвенной среды.

Увеличение объемной массы в пирогенно-преобразованных почвах соответствует тренду зольно-

сти (рис. 3, Г). Сведения о резком уменьшении пористости по мере сгорания органического вещества почв находим также в литературе [37]. Современные пирогенные почвы (0–20 см), сложенные в основном торфяным субстратом (кластеры I, II, III) слабо различаются влажностью 209–231% (в среднем 221%), соотносясь, тем не менее, с количеством углерода – чем его больше, тем оно выше. Влажность деструктивных почв кластера IV, преимущественно органо-минерального состава, составляет 172%. При пересчете влажностного содержания в объемные проценты наиболее рыхло сложенные почвы кластера I переходят в качество наименее обводненных (рис. 3, Д).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследована среднесрочная трансформация лесных почв заболоченной речной долины восточного макросклона Кузнецкого Алатау с торфяными и торфянистыми горизонтами, испытавшими 20 лет тому назад воздействие устойчивого лесоторфяного пожара. В профиле пирогенных почв влияние пожара сохранилось в виде древесных углей, серовато-сизых скоплений золы и высокой пластичности торфа. Физико-химические показатели, отличаясь высокой вариабельностью (C_v 25–33%), характеризуют пирогенный торфяной субстрат в пределах повышенной зольности (среднее 54%), объемной массы (0.3 g/cm^3), слабощелочной реакции среды (рН 7.3) и относительно низкого содержания органического углерода (20%).

Методами многомерного статистического анализа выделено 4 кластера пирогенных почв и выполнена объективная оценка контрастности их свойств. Приоритетными возможностями (93%) различать почвенные образования (кластеры) обладает дискриминантная функция 1, в значение которой наибольший вклад вносит содержание органического углерода. Объективная группировка отождествляет чередование пирогенных почв – торфяных, глееземов торфянистых, глееземов мелкоторфянистых и деструктивных протяженностью от 40 до 110 м, характеризующих пятнистые почвенные комбинации пожара. И.

Получена новая информация о дополнительной убыли углерода в невыгоревшем торфе (механический и химический недожог), которая уточняет сведения о его потерях, оцениваемых в основном по глубине прогорания торфяной толщи. Под воздействием слабого, умеренного, среднего и интенсивного теплового воздействия потери углерода составили 4, 35, 46 и 67% от фона. Величина добавочных потерь углерода эквивалентна выбросам в атмосферу углекислого газа в пределах 1.4–23 kg/m^2 .

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Агрохимические методы исследования почв. М.: Наука, 1975. 436 с.
2. Амосов Г.П. Некоторые особенности горения при лесных пожарах. Л.: ЛенНИИЛХ, 1958. 29 с.
3. Васильев С.В. Лесные и болотные ландшафты Западной Сибири. Томск: Изд-во науч.-техн. лит.-ры, 2007. 276 с.
4. 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.
5. Габбасова И.М., Сулейманов Р.Р. Оценка состояния и рекультивация пирогиено-деградированных торфяных почв // Изв. Самарского НЦ РАН. 2011. Т. 13. № 1. С. 223–228.
6. Глухова Т.В., Сирин А.А. Потери почвенного углерода при пожаре на осушенном лесном верховом болоте // Почвоведение. 2018. № 5. С. 580–588. <https://doi.org/10.7868/S0032180X18050076>
7. Гришуткин О.Г. Влияние пожаров 2010 года на болотные экосистемы Мордовского государственного природного заповедника // Тр. Мордовск. гос. природ. заповедника им. П.Г. Смиловича. Саранск: ЭМ ПРИНТ, 2012. Вып. 10. С. 261–265.
8. Гундар С.В. Почвенные пожары в бассейне Нижнего Амура, их профилактика и тушение. Автореф. ... дис. канд. с.-х. н. Красноярск, 1978. 24 с.
9. 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. <https://doi.org/10.1134/S002411481804006X>
10. Ефремова Т.Т., Аврова А.Ф., Ефремов С.П. Расчетный метод определения углерода в торфах и моховых подстилках лесных болот по зольности растительного субстрата // Сибирский лесной журн. 2016. № 6. С. 73–83.
11. Ефремова Т.Т., Ефремов С.П. Пирогенная трансформация органического вещества почв лесных болот // Почвоведение. 2006. № 12. С. 1441–1450.
12. Ефремова Т.Т., Ефремов С.П. Торфяные пожары как экологический фактор развития лесоболотных экосистем // Экология. 1994. № 5. С. 27–34.
13. Зайдельман Ф.Р., Морозова Д.И., Шваров А.П. Изменение свойств пирогиенных образований и растительности на сгоревших осушенных почвах полесий // Почвоведение. 2003. № 11. С. 1300–1309.
14. Зайдельман Ф.Р., Морозова Д.И., Шваров А.П. Изменение химических свойств пирогиенных образований после пожаров на осушенных низинных торфяных почвах // Вестник Московского университета. Сер. 17. Почвоведение. 2004. № 1. С. 25–29.
15. Качинский Н.А. Физика почвы. М.: Высшая школа, 1965. 323 с.
16. 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.
17. Классификация и диагностика почв России. Смоленск: Ойкумена, 2004. 342 с.
18. Копотева Т.А., Купцова В.А. Влияние пожаров на функционирование фитоценозов торфяных болот Среднеамурской низменности // Экология. 2016. № 1. С. 14–21.
19. Курбатский Н.П., Красавина Н.Н., Жданко В.А. Лесные почвенные пожары и борьба с ними. Л., 1957. 32 с.
20. Лайком А.О., Голубина О.А. Деградация эвтрофных торфяных почв при пожарах на примере месторождения Таган // Вестн. Томского гос. пед. ун-та. 2013. № 8. С. 137–142.
21. Липатов Д.Н., Щеглов А.И., Манахов Д.В., Брехов П.Т. Пространственная неоднородность свойств торфяных почв верховых болот в условиях локального пирогиенеза на северо-востоке острова Сахалин // Почвоведение. 2016. № 2. С. 261–274.
22. Лосев К.С. Естественнонаучная база устойчивости жизни // Вестник РАН. 2003. Т. 73. № 2. С. 110–116.
23. Мелехов И.С., Душа-Гудым С.И., Сергеева Е.П. Лесная пироэкология: учебное пособие. М.: ГОУ ВПО МГУЛ, 2007. 296 с.
24. Мировая реферативная база почвенных ресурсов 2014. Международная система почвенной классификации для диагностики почв и создания легенд почвенных карт. Исправленная и дополненная версия 2015 / Научные редакторы перевода: М.И. Герасимова, П.В. Красильников. ФАО и Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, 2017. 203 с.
25. Пьявченко Н.И. Биогеоэкологические закономерности генезиса болот и динамика растительного покрова // Генезис и динамика болот. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1978. С. 13–18.
26. Раковский В.Е., Каганович Ф.Л., Новичкова Е.А. Химия пирогиенных процессов. Минск: АН БССР, 1959. 208 с.
27. 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. <https://doi.org/10.1134/S0024114819050097>
28. Софронов М.А., Волокитина А.В. Пожары в заболоченных лесах Западной Сибири // Гидроморфные лесоболотные экосистемы. Красноярск: ИЛИД, 1986. С. 139–150.
29. Софронов М.А., Волокитина А.В. Рекомендации по охране от пожаров южно-таежных заболоченных лесов Сибири. Красноярск: Ин-т леса им. В.Н. Сукачева СО РАН (ИЛ СО РАН), 2012. 42 с.
30. Фридланд В.М. Проблемы географии, генезиса и классификации почв. М.: Наука, 1986. 243 с.
31. Фуряев В.В. Влияние уровней грунтовых вод на пожарное созревание заболоченных и болотных лесов Кеть-Чулымского междуречья // Вопросы лесной пироэкологии. Красноярск, 1970. С. 186–220.

32. Халафян А.А. Statistica 6. Статистический анализ данных. М.: ООО "Бином-Пресс", 2007. 515 с.
33. Benscoter B.W., Greenacre D., Turetsky M.R. Wildfire as a key determinant of peatland microtopography // Canadian J. Forest Research. 2015. V. 45. № 8. P. 1132–1136. <https://doi.org/10.1139/cjfr-2015-0028>
34. Benscoter B., Wieder K., Vitt D.H. Linking micro-topography with post-fire succession in bogs // J. Veg. Sci. 2005. V. 16. P. 453–460.
35. Dyrness C.T., Norum R.A. The effects of experimental fires on black spruce forest floors in interior Alaska // Canadian J. Forest Research. 1983. V. 13. P. 879–893.
36. Efremova T.T., Efremov S.P. Ecological Effects of Peat Fire on Forested Bog Ecosystems // Fire in Ecosystems of Boreal Eurasia. Dordrecht. Boston/London: Kluwer Academic Publishers, 1996. Printed in the Netherlands. P. 350–357.
37. Giovannini G., Lucchesi S., Giachetti M. Soil aggregation and cementation as affected by heating // Trans. 13. Congr. Int. Soc. Soil Sci. Hamburg, 13–20 Aug., 1986. V. 2. P. 58–59.
38. Hu Y., Fernandez-Anez N., Smith T.E.L., Rein G. Review of emission from smouldering peat fire and their contribution to regional haze episodes // International J. Wildland Fire. 2018. V. 27. P. 293–312. <https://doi.org/10.1071/WF17084>
39. Huang X., Rein G. Downward spread of smouldering peat fire: the role of moisture, density and oxygen supply // Int. J. Wildland Fire. 2017. V. 26. P. 907–918. <https://doi.org/10.1071/WF16198>
40. 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 J. Forest Research. 2005. V. 35. P. 2164–2177.
41. 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.
42. 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.
43. Tuittila E.-S., Välijärvi M., Laine J., Korhola A. Quantifying patterns and controls of mire vegetation succession in a southern boreal bog using a combination of partial ordinations // J. Veget. Sci. 2007. V. 18. P. 891–902.
44. Turetsky M.R., Amiro B.D., Bosch E., Bhatti J.S. Historical burn area in western Canadian peatlands and its relationship to fire weather indices // Glob. Biogeochem. Cycle. 2004. V. 18. P. 1–9.
45. Turetsky M.R., Wieder R.K. A direct approach to quantifying organic matter lost as a result of peatland wildfire // Canadian J. Forest Research. 2001. V. 31. P. 363–366.
46. 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. V. 15. P. 63–81.

Forest Pyrogenic Peat Soils and Gleyzems in Swampy Mountain Valleys in the South of Yenisei Siberia

T. T. Efremova^{1, *}, A. V. Pimenov¹, S. P. Efremov¹, and A. F. Avrova¹

¹Sukachev Institute of Forest SB RAS, Federal Research Center, Krasnoyarsk Science Center SB RAS, Krasnoyarsk, 660036 Russia

*e-mail: efr2@ksc.krasn.ru

The differences of eutrophic peat soils (Hypereutric Sapric Histosols) and peaty gleyzems (Eutric Histic Gleysols) 20 years after a forest-peat fire were studied on the example of a spruce forest in the swampy river valley of the Kuznetsk Alatau (altitude 622 m). Soils with peat and peaty horizons are characterized by high variability of properties (Cv 25–33%). The ash content varies in the range of 23–81%, the pH values range is 5.8–8.2, that of density is 0.094–0.494 g/cm³, the organic carbon content is 7–37%, and the volume moisture of peat soil is 31–85%. Four groups of pyrogenic peat soils were objectively identified based on statistical parameters. Organic carbon content has the maximum ability to differentiate clusters (93%). A much smaller proportion of the difference is provided by the moisture of peat soil (6%). Soil clusters identified at the taxonomic level of the species as peat, peaty gleyzems, shallow peaty gleyzems and destructive ones identify the soil cover pattern of the fire area. New information complements and clarifies the data on carbon losses, which are estimating mainly by the depth of burning of the peat layer. The value of additional losses within the 0–20 cm layer is 0.4–6.3 kg C/m² depending on the intensity of pyrogenic effects, being equivalent to carbon dioxide emissions from 1.4 to 23 kg/m².

Keywords: carbon losses, clusters of soil, multivariate statistical analysis, forest-peat fires, passive smoldering