

Влияние лесоторфяных пожаров на почвы и потери углерода в фитогенных микроповышениях горных болот юга Средней Сибири

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 09.12.2020

После доработки 16.12.2020

Принята к печати 30.12.2020

АННОТАЦИЯ

Дана оценка контрастности физико-химических свойств пирогенных почв и потерям углерода спустя 20 лет после крупного пожара в болотном ельнике (*Picea obovata* Ledeb.) одного из долинных комплексов малых рек Кузнецкого Алатау (Республика Хакасия). Площадь пожарища занята в настоящее время березняком (*Betula pubescens* Ehrh.) кустарниковым осоково-зеленомошно-гипновым, относящимся к группе кратковременно-производных постпирогенных травяных лесов. Пирогенные почвы (механический и химический недожог), сформированные в результате пассивного тления – термического воздействия ниже точки воспламенения, характеризуются высокой вариацией физико-химических показателей (*Cv* 26–37 %). Методами многомерного статистического анализа (кластерного, дискриминантного, канонического) сформированы и статистически обоснованы четыре кластера, отождествляющих пирогенные ряды почв. В совокупном вкладе химических показателей в разграничение кластеров наибольшая доля принадлежит органическому углероду (83 %), значительно меньшая – объемной влажности (15 %). На основании разнообразия и обилия следов пожара в профиле пирогенных почв условно связываем их с влиянием слабого, умеренного, среднего и сильного теплового воздействия. Пропорционально силе огня кластеры почв в 1,6–2,7 раза обогащаются зольными компонентами, содержание которых колеблется от 18,9 до 77 %, в 2,2–4,3 раза уплотняются – объемная масса достигает 0,147–0,421 г/см³, величина рН последовательно смещается с 6,8 до 7,6. Предложен новый подход к оценке потерь углерода в процессе пассивного тления торфа по разнице в содержании до и после пожара, который дополняет традиционный метод учета по глубине прогорания торфяной толщи. В слое 0–20 см пирогеной залежи добавочные потери углерода составляют от 1,6 до 4,0 кг/м², что эквивалентно выбросам в атмосферу 5,9–14,8 кг/м² СО₂. Сведения о дополнительной убыли углерода на стадии пассивного тления торфяной залежи приводятся впервые.

Ключевые слова: эвтрофные торфяные почвы (Hypereutric Sapric Histosols), кластеры пирогенных почв, потери углерода, многомерный статистический анализ, лесоторфяные пожары.

Горные леса Южной Сибири относятся к группе растительных сообществ со сложным и длительным циклом развития, который, наряду с эдафическими и топоэкологическими условиями, засухой, эпифитотиями, обусловлен природными и антропогенными пожарами. Геоинформационный анализ показал неуклонный рост частоты пожаров в сред-

не- и низкогорных темнохвойных и лиственнично-сосновых лесах Приенисейской части Алтае-Саянской горной страны начиная с 80–90-х годов [Пономарев, Харук, 2016]. Прогнозируется дальнейший рост количественных показателей горимости в регионе. При этом мало изученной остается экологическая роль торфяных пожаров в функционировании лесоболотных экосистем, сформированных в долинах рек, крупных ручьев, на участках выклинивания ключевых вод у подножия пологих склонов гор. В Кузнецком Алатау, части Алтае-Саянской горной страны, торфонакопление, согласно радиоуглеродному датированию, началось более 5000 лет тому назад – 5035 ± 95 (СОАН-8571). Во влажных распадках и падах развивались заболоченные леса, в частности, болотные ельники, относящиеся к категории доминирующих интразональных образований Алтае-Саянского экорегиона [Назимова и др., 2020], которые к настоящему времени практически не охвачены исследованиями.

Заболоченные леса и болота включены в третью группу природной пожарной опасности: вероятность дня с пожарной зрелостью в этой группе мала [Фурьев, 1970]. Тем не менее болотные леса с высокополнотными древостоями подвержены циклическому воздействию пожаров. Выделяют открытые или “комбинированные” пожары и подземные почвенно-торфяные, для которых характерно беспламенное горение [Курбатский и др., 1957; Гундар, 1978, Софронов, Волокитина, 1986, 2012]. Опасность возгорания создается погодными условиями, при которых осадки составляют 60–80 % от средних многолетних данных за пожарный сезон, уровень стояния почвенно-грунтовых вод опускается ниже 50 см, а влагосодержание торфа достигает критических значений – 200 %. Пожары на болотах в силу присутствия водоизбыточных горизонтов не приводят к полному выгоранию торфяного субстрата и сопровождаются механическим и химическим недожогом [Амосов, 1958]. Механический недожог – это доля горючего материала, не участвующего по каким-либо причинам в горении. Химический недожог характеризуется неполным сгоранием продуктов газификации (дымом) и образованием углеродистого остатка. Изучение химии пирогенных процессов по мокрому

обугливанню торфа в лабораторных опытах показало, что течение процессов термического распада происходит при участии воды как растворителя и как химического агента [Раковский и др., 1959]. Даже при относительно низких температурах это вызывает довольно глубокие изменения в составе органического вещества торфа на фоне собственно распада органических соединений. Глубина процессов растет с повышением влажности и температуры торфа.

Особенностью лесных и торфяных пожаров является высокая рассредоточенность в пространстве, обусловленная неоднородностью состава, сомкнутостью и густотой древостоя, синузальной структурой напочвенного покрова, степенью увлажнения горючего материала, захламленностью древесными остатками, характером микрорельефа и т. д. [Мелехов и др., 2007; Dyrness, Norum, 1983; Miyanishi, Johnson, 2002; Kasischke, Johnstone, 2005; Сирий и др., 2019]. Между тем сведений о пространственной вариабельности свойств торфяных массивов, испытавших огневое воздействие, немного [Лайком, Голубина, 2013; Липатов и др., 2016], а влияние микрорельефа практически не обсуждается. Однако для понимания закономерностей послепожарной сукцессии болотных экосистем необходимо принимать во внимание многочисленные последствия взаимодействий целого ряда факторов [Wieder et al., 2009].

Цель работы – оценить пространственную неоднородность почв положительных и отрицательных элементов микрорельефа лесоторфяного пожарища, выполнить в системе фитогенных повышений объективную группировку пирогенных почв по физико-химическим показателям и учесть дополнительные потери углерода в процессе пассивного тления торфяного субстрата.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Изучались торфяные массивы долинных комплексов малых рек восточного макросклона Кузнецкого Алатау, занятых болотными ельниками. В предгорьях и речных долинах Кузнецко-Салаирской горной страны июльская температура воздуха находится в пределах $17,5–18,5$ °C ($\Sigma_t > 10$ °C – 1600–1900 °C), за теплый период года выпадает 320–670 мм

осадков, температура воздуха в январе $-14...-19\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($\Sigma_t < 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ $-1350...-2030\text{ }^{\circ}\text{C}$), мощность снежного покрова достигает 20–85 см [Трофимова и др., 2019]. Заболоченные долины с устойчивым мерзлотно-торфяным водупором питаются подземными водами, надмерзлотной верховодкой, аллювиальными и делювиальными потоками, дополнительно обогащающих торфяную залежь минеральными компонентами.

Ключевым объектом исследования послужил эвтрофный болотный массив (1,8 тыс. га), залегающий в долине р. Тунгужуль (622 м над ур. м.) неширокой полосой протяженностью 37 км. Заболоченная долина занята разновозрастным (72–410 лет) зеленомошно-гипновым ельником (*Picea obovata* Ledeb.) Va класса бонитета. Кроны и стволы деревьев густо обросли лишайниками преимущественно из семейства *Usneaceae* Eschw. Напочвенный покров сформирован одновидовыми и смешанными группировками зеленых и гипновых мхов, образующих хорошо выраженный фитогенный микрорельеф. Повышенные элементы от 20 до 70 см представлены в основном монодоминантными синузиями аулакомниума вздутого (*Aulacomnium turgidum* (Wahlenb.) Schwaegr.), дрепанокладуса крючковатого (*Drepanocladus uncinatus* (Hedw.) Warnst.) в виде моховых бугров и занимают 40–50 % площади.

Болотный ельник сухой весной 1999 г. пройден крупным (более 200 га) лесоторфяным пожаром вблизи д. Усть-Тунгужуль (Республика Хакасия). Сперва пожар начался в лесном массиве на суходоле, а затем перекинулся на болото. Активному развитию верхового пожара в болотном ельнике способствовало обильное разрастание на ветвях елей кустистых лишайников, спускающихся практически до самой поверхности торфяной залежи. Подземный пожар (тление) возник вследствие иссушения торфа и продолжался (“курился”), по рассказам местных жителей, около трех лет.

Спустя 20 лет пожарище представляет собой труднопроходимую территорию, занятую густым березняком (*Betula pubescens* Ehrh.) кустарниковым осоково-зеленомошным, относящимся к группе кратковременно-производных постпирогенных травяных лесов. Возраст березняков 17–20 лет соответствует послепожарному периоду. Поверхность гари имеет хорошо выраженный микрорельеф

в виде пестрой мозаики положительных и отрицательных элементов из кочек, осок, мхов и скоплений валежника. Положительные элементы фиторельефа занимают примерно 40 % и формируются мхами – *Aulacomnium palustre* (Hedw.) Schwägr., *Pleurozium schreberi* (Brid.) Mitt., *Hylocomium splendens* (Hedw.) Br. et al. Субдоминантами выступают осока дернистая (*Carex cespitosa* L.), покрытие которой достигает 20–30 %, соскорея малоцветковая (*Saussurea parviflora* (Poir.) DC), вейник Лангсдорфа (*Calamagrostis langsdorffii* (Link) Trin.).

Сплошное зарастание пожарища не позволяет визуально обнаружить признаки горения торфяного субстрата и оценить степень его преобразования в пространстве. Поэтому применили “линейный метод” исследования, который особенно полезен для характеристики элементов, скрытых от непосредственного наблюдения [Софронов, Волокитина, 2007]. “Линейный метод” закладки экологического профиля создает возможность не только делать описания и измерения по линии трансекты, но и производить ее деление на однородные (однотипные) части и осуществлять различные варианты их группировки. На территории пожарища вдоль русла реки на расстоянии 25–35 м от береговой линии заложили эколого-пирологическую трансекту (полигон) протяженностью 300 м (географические координаты $54^{\circ}14'30,60''$ с. ш., $89^{\circ}36'03,10''$ в. д. – $54^{\circ}14'24,70''$ с. ш., $89^{\circ}35'59,40''$ в. д.). Полигон разбили на пять пробных площадей (10×10 м) с расстоянием 50–60 м друг от друга. Руководствуясь доминирующим напочвенным покровом, выделили на каждой по два участка, в пределах которых закладывали почвенные разрезы по элементам микрорельефа: мочажины – индекс М, повышения – П (рис. 1). Пирогенные почвы отбирались в четырех повторностях в виде монолитов $35 \times 35 \times 40$ см, которые расчленялись на генетические горизонты. В итоге взято более 150 образцов. В данной статье обсуждаются результаты огневого воздействия на микроповышения, на мочажины рассматриваются в отдельном сообщении. Интенсивность пожара оценивали косвенно по морфолого-генетическим признакам профиля пирогенных почв: наличию подстилки и ее мощности, разнообразию непосредственных признаков пожара – углей, прослойки пирогенной золы, углистых прима-

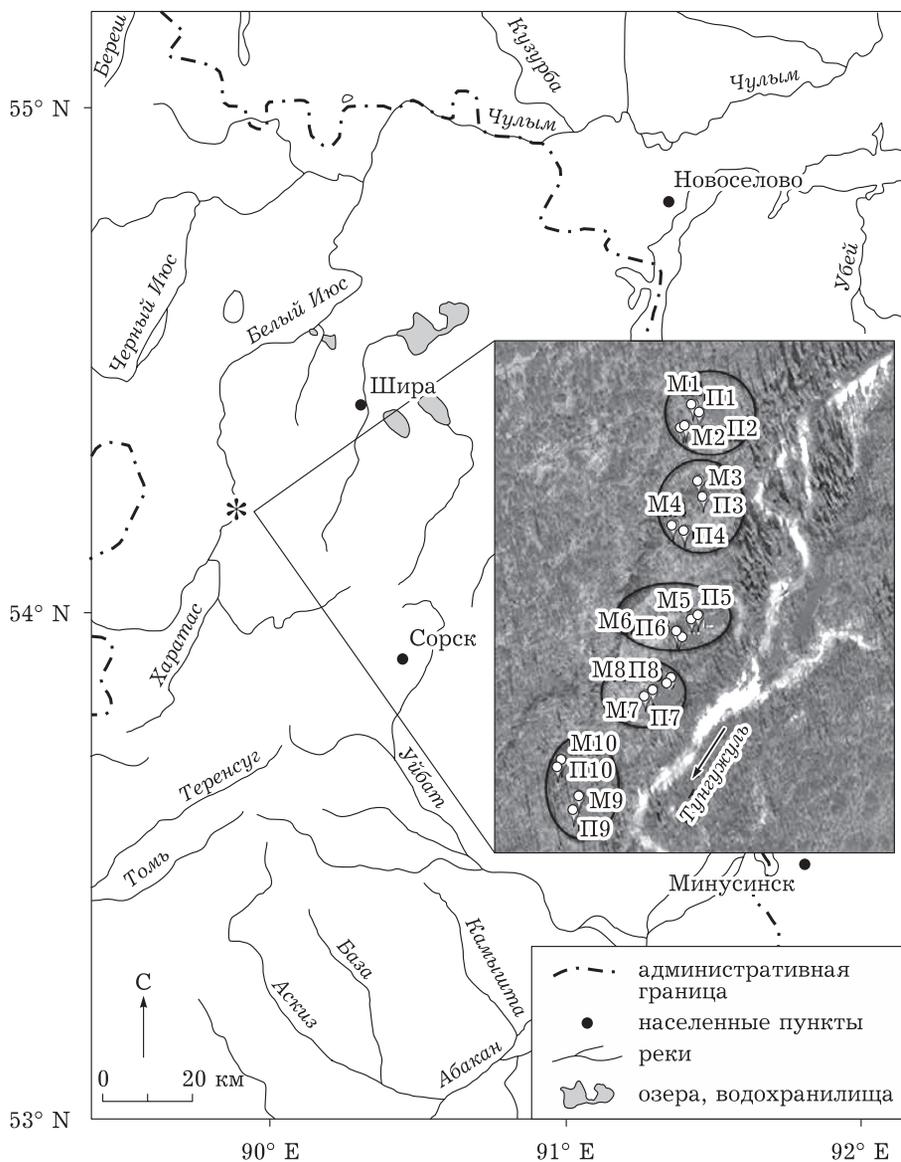


Рис. 1. Карта-схема района исследований. Размещение пробных площадей (окружности) и участков пироторфяных почв (цифры) в пределах эколого-пирологической трансекты на зимнем космическом снимке. Элементы микрорельефа: П – повышение, М – мочажина

зок и степени пластичности торфа. В качестве вспомогательных критериев использовали степень агрегированности торфа, а также освоенность корнями и почвенными животными.

На химический анализ поступали современные почвы преимущественно из корнеобитаемой зоны 0–20 (25) см. Зольность торфа определялась сжиганием в муфельной печи при температуре 850 °С, величина рН – потенциометрически, объемная масса – методом режущего кольца [Агрохимические методы, 1975]. Содержание углерода вычисляли на эле-

ментном анализаторе FLASH™1112 (производитель Thermo Quest Italia). Пластичность торфяного субстрата оценивали, пользуясь рекомендациями Н. А. Качинского [1965]. Многомерный статистический анализ выполнен в программе EXCEL и STATISTICA 6 по руководству [Халафян, 2007].

РЕЗУЛЬТАТЫ

Содержание углерода и физико-химические показатели пирогенных торфяных почв

характеризуются в географических координатах эколого-пирологической трансекты. Для построения трехмерных поверхностей положительных и отрицательных элементов микрорельефа использовали метод ординарного кригинга по умолчанию в программе Surfer 9. Своеобразие свойств торфяных почв пожараща наглядно представлено на рис. 2. Судя по характеру поверхности эколого-пирологической трансекты, отождествляющей показатели зольности, содержания углерода, плотности сложения, величине рН, объемной влажности, пирогенные почвы понижений и повышений испытали различную, в большинстве случаев прямо противоположную, силу огневого воздействия. Объективную оценку своеобразия почв по элементам микрорельефа выполнили методом дискриминантного анализа. В качестве предикторов использовали всю совокупность физико-химических показателей. Судя по уровню значимости, пирогенные торфяные почвы микроповышений и мочажин статистически достоверно различаются между собой, а итоговое разбиение характеризуется 76%-м попаданием в соответствующую совокупность (табл. 1). Целесообразность дифференцированной оценки воздействия пожара на свойства торфяных почв различных элементов микрорельефа объективно подтверждена. Подробнее остановимся на почвах микроповышений.

Пирогенные почвы положительных элементов рельефа характеризуются в среднем повышенной зольностью, слабощелочной реакцией среды, довольно низким для торфяных почв содержанием углерода, сравнительно высокой плотностью сложения и влагонасыщенностью, а также значительной вариабельностью свойств: коэффициенты вариации (Cv), за исключением рН, выше 25 % (табл. 2).

Многомерный статистический анализ

Выявленную неоднородность физико-химических свойств пирогенных почв повышенных элементов микрорельефа систематизировали с помощью метода древовидной кластеризации. В качестве предикторов использовали: содержание углерода, величину рН и объемную влажность – производный показатель влагосодержания и объемной массы. Зольность исключили из статистического анализа – она тесно сопряжена с содержанием углерода [Ефремова и др., 2016]. Как следует из рис. 3, а, почвы участков в основном один за другим последовательно объединились в четыре кластера. Кластеры I, II и IV включают по два близко расположенных объекта, кластер III – четыре. Достоверность межгрупповых различий оценили с помощью дискриминантного анализа. Объединенные классы почв достоверно отличаются друг от друга, судя по уровню значимости, и характеризуются 100%-м попаданием в соответствующую группу (табл. 3). Исходя из расстояния Махаланобиса между кластерами, наиболее удалены по свойствам объединенные участки (III10 + III7) и (III3 + III4 + III5 + III8).

Для нахождения взаимосвязи между выделенными кластерами и набором переменных по содержанию углерода и физико-химическим показателям применили канонический корреляционный анализ. Взвешенные суммы переменных из каждого множества определяют канонический корень – некую “скрытую” переменную, объясняющую долю изменчивости между двумя наборами переменных. Максимальное число оцениваемых корней равно числу переменных наименьшего подмножества минус единица. В нашем случае по числу выделенных кластеров оцениваем три кано-

Т а б л и ц а 1

Оценка межгрупповой дисперсии пироторфяных почв по элементам микрорельефа методом дискриминантного анализа

Элементы микрорельефа	р-уровень значимости различий		Матрица классификации		
	П	М	Доля попадания, %	Число попаданий	
				П	М
Повышения – П	–	<0,001	78	58	16
Мочажины – М	<0,001	–	73	21	56
			Итоги классификации		
			76	79	72

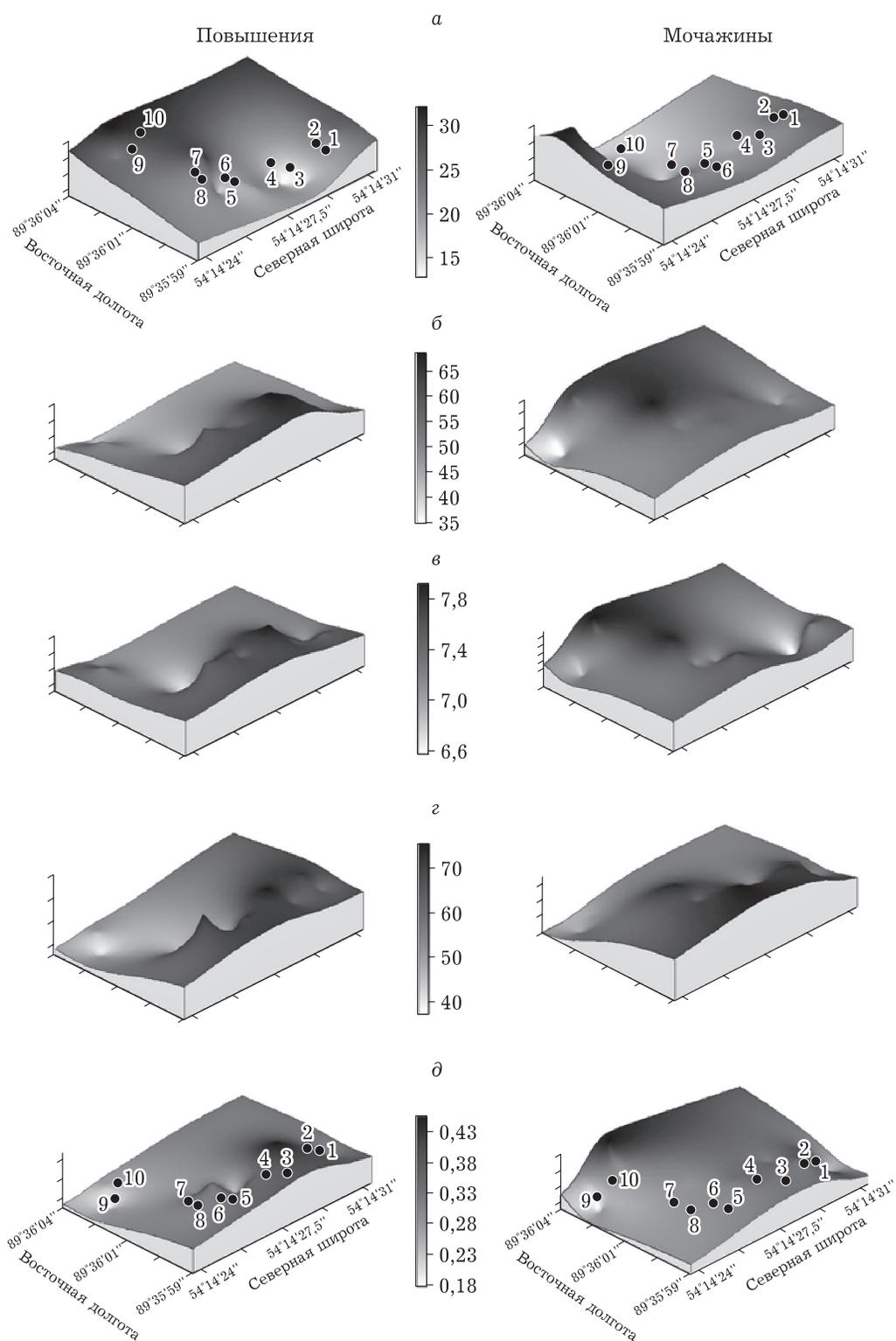


Рис. 2. Трехмерная поверхность физико-химических показателей почв повышений и мочажин в пределах эколого-пирологической трансекты. а – содержание углерода, %; б – зольность, %; в – величина рН; г – объемная влажность, %; д – объемная масса, г/см³

Статистическая оценка свойств пироторфяных почв положительных элементов микрорельефа пожараща

Статистический показатель	Углерод, %	pH _{H2O}	Зольность, %	Объемная масса, г/см ³	Влагоудержание, %	Объемная влажность, %
Среднее	21,2	7,3	52,5	0,291	186,8	52,94
<i>m</i> x	1,3	0,1	2,4	0,012	6,8	2,1
Медиана	18,7	7,5	57,3	0,275	181,9	53,95
Минимум	8,2	5,8	18,9	0,147	109,2	24,14
Максимум	38,9	8,3	77,0	0,421	290,6	83,70
<i>C</i> v, %	37	9	29	26	27	26

П р и м е ч а н и е. *m*x – ошибка средней арифметической; *C*v – коэффициент вариации, %.

нических корня (табл. 4). По *p*-уровню видно, что все три корня значимы в дискриминации. Собственные значения корней и коэффициенты канонической корреляции показывают, что наиболее тесная связь кластеров почв обнаруживается с первым каноническим корнем $R = 0,94$, со вторым – $0,74$, с третьим – $0,34$.

О лучшем разграничении кластеров торфяных почв по корню 1 свидетельствует также статистика λ Уилкса, которая, являясь обратной мерой, приближается к нулю. Согласно критерию Кайзера нагрузки канонических факторов (корней) можно интерпретировать так же, как в факторном анализе, т. е. к рас-

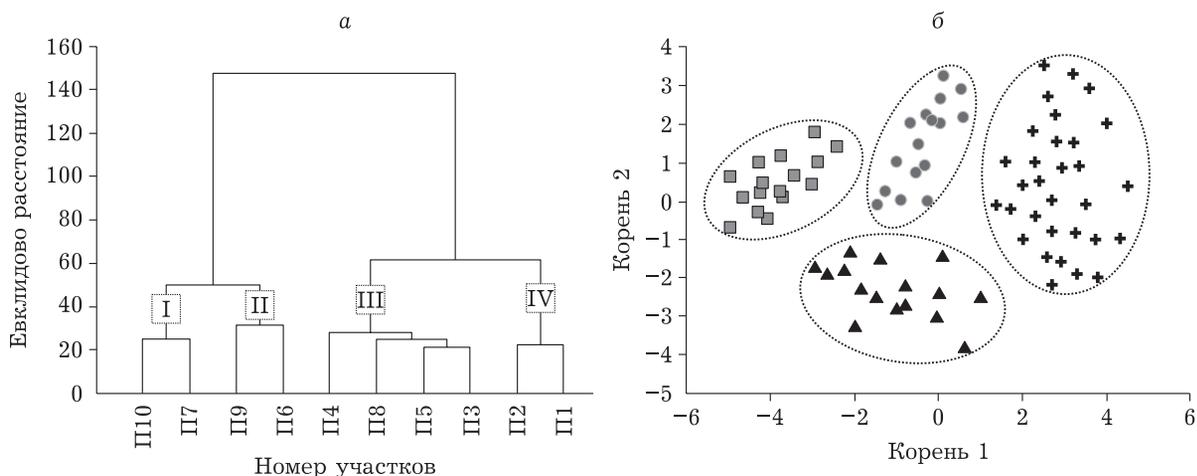


Рис. 3. Объединение пироторфяных почв в многомерном пространстве физико-химических показателей. а – древовидная кластеризация; б – размещение на плоскости в координатах дискриминантных функций (корней) канонических значений для каждого наблюдения

Оценка межгрупповой дисперсии кластеров пироторфяных почв положительных элементов микрорельефа

Индекс кластера	Квадраты расстояний Махаланобиса, <i>p</i> -уровни значимости				Матрица классификации				
	I	II	III	IV	Доля попадания, %	Число попаданий			
						I	II	III	IV
I	–	12,7	37,9	9,8	100	16	0	0	0
II	<0,001	–	15,5	9,0	100	0	16	0	0
III	<0,001	<0,001	–	12,5	100	0	0	31	0
IV	<0,001	<0,001	<0,001	–	100	0	0	0	16
						Итоги классификации			
					100	16	16	31	16

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

Результаты канонического анализа кластеров пироторфяных почв микроповышений

Оценка значимости корней, переменные	Корень 1	Корень 2	Корень 3
Собственное значение	6,927	1,239	0,133
Каноническая корреляция, R	0,935	0,744	0,343
λ -Статистика Уилкса	0,050	0,394	0,883
χ^2 -Критерий	103,546	32,120	4,306
p -Уровень значимости	<0,001	<0,001	0,038
Доля объясненной дисперсии	0,83	0,15	0,02
Доля объясненной дисперсии, %	83	15	2
	Стандартизованные коэффициенты		
pH_{H_2O}	0,04	-0,66	-1,00
Углерод	-0,83	0,08	-0,83
Объемная влажность	0,55	0,82	-0,26

смотрению числа корней принимаются те, собственные значения которых больше единицы [Ким и др., 1989]. Поэтому корень 3 исключается из обсуждения. Кумулятивная доля объясненной дисперсии первого корня составляет 83 %, второго – 15 %.

Стандартизованные коэффициенты позволяют определить для каждой переменной наибольшую долю в совокупный вклад (“вес”) в значение дискриминантной функции (корня). Наибольшую долю в значение корня 1 вносит углерод, в корень 2 – объемная влажность. Диаграмма рассеяния значений нестандартизованных канонических коэффициентов для каждого наблюдения в координатах первых двух корней показывает большую межгрупповую вариацию относительно внутригрупповой (рис. 3, б). Ясность полученной конфигурации точек на диаграмме в исходном многомерном пространстве признаков указывает на высокое качество согласия с воспроизводимой группировкой пирогенных торфяных почв.

ОБСУЖДЕНИЕ

Морфолого-генетическое строение кластеров пирогенных лесных торфяных почв

Пирогенная торфяная залежь в зависимости от силы огневого воздействия включает разнообразные признаки пожара – угли, прослойки пирогенной золы, углистые примазки, обгоревшие остатки древесины, и обнаруживает принципиально новое свойство торфа – пластичность (липкость). Пирогенная толща представляет собой достаточно плотный, хорошо разложившийся субстрат, однородный по составу (растительные остатки визуаль-

но не идентифицируются), бурого и темно-бурого цвета. Торф в разной степени оструктурирован преимущественно зернистыми непрочными агрегатами гумусовой природы. Верхние 15–20 см насыщены живыми корнями и освоены почвенными животными-гумусообразователями, в основном энхитреидами.

Кластер I (П7, П10). Торфяная подстилка 0–3 (4) см желто-бурого цвета, сложена остатками мхов, инкрустирована древесным опадом. Охвачена белесоватой ватообразной плесенью. Единично обугленные фрагменты древесины на глубине 2–3 см. Торфяной субстрат наполовину (по объему) агрегирован. Загруженность живыми корнями до глубины 18 см.

Кластер II (П6, П9). Лесная подстилка мощностью 1 см серо-соломенного цвета. Слагается остатками трав (преимущественно осоки дернистой) с включением древесного опада. Ниже достаточно много мелких углей и обгоревших древесных остатков. Торфяная толща на 80 % агрегирована. Освоенность живыми корнями в пределах 19 (22) см. Обильны дождевые черви и энхитреиды. За пределами 20 см (в среднем) органоминеральный субстрат бурого с серым оттенком цвета. Плотный, монолитного сложения.

Кластер III (П3, П4, П5, П8). Лесная подстилка мощностью 0,5–1,0 см от соломенно-желтых до бурых оттенков. Сформирована хорошо сохранившимися остатками осоки дернистой, древесных растений и мхов. Сплошной слой углей и обгоревших фрагментов древесины залегает на глубине 1,5–3 см. Ниже – небольшой пласт (2–3 см) пирогенной золы и диспергированных углей (сажистые примазки). Торфяной субстрат творожистой структуры. Освоен живыми корнями

в пределах 13 (15) см. В верхней части профиля (0–5 см) много энхитреид. Глубже 15 см – органоминеральный субстрат бурого цвета с серым оттенком. Слабо пластичен: скатывается в шнур, при смыкании кольцо ломается.

Кластер IV (П1, П2). Торфянистая подстилка 4–6 см бурого цвета. Доминирует ферментативный подгоризонт. Сложена преимущественно трудно различимыми остатками мхов. Включает точечную белесоватую плесень. На глубине 5 (6) см нередко угли, обгоревшие остатки древесины и коры. Мощность торфяного субстрата более 25 см. Корненасыщенный слой 15 (17) см, агрегированность до 65 %. Единично – энхитреиды.

Таким образом, пирогенные субстраты кластеров I и IV характеризуются некоторыми общими (с небольшой вариацией) признаками. Это – сформированные подстилки (скорее всего, сохранившиеся после пожара), единичные и нечастые включения углей, мощность торфа более 25 см, его относительно меньшая агрегированность, участие низших грибов (плесени) в разложении растительных остатков и слабое освоение почвенными животными. На этом основании можно предположить, что участки (П7 + П10) и (П1 + П2) испытали тепловое воздействие условно слабой и умеренной силы. Участки (П3 + П4 + П5 + П8), объединенные кластером III, пройдены сильным пожаром, судя по обилию углей, прослойкам золы, пластичности торфа, укороченному торфяному слою и началу формирования лесной подстилки. Глубокие изменения в составе органического вещества обусловили высокую агрегированность торфяного субстрата и активное заселение почвенными животными. Торфяная толща кластера II (П6 + П9) по ряду признаков сходна с участками в составе кластера III, но не содержит прослоек пирогенной золы и не обладает свойством пластичности. Поэтому на этих объектах характеризуем силу огневого воздействия как условно среднюю.

Содержание углерода и физико-химические свойства пирогенных почв положительных элементов микрорельефа

Горение торфяников протекает преимущественно в виде “тления” в термическом режиме ниже точки воспламенения (беспламенная фаза). Источником горения является

органический углерод, количество которого, как показано выше, на 83 % дискриминирует неоднородность пирогенных почв (физический и химический недожог). Исходя из этого можно предположить: чем меньше углерода содержится в невыгоревшем торфяном субстрате, тем выше условная сила огня. По содержанию углерода кластеры пирогенных почв образуют следующий ряд: $III_{15,3} < II_{21,8} < IV_{24,1} < I_{29,2}$ (нижний индекс – содержание углерода, %). Отсюда следует, что условно сильным пожаром пройдены почвы кластера III (участки П3, П4, П5, П8), средним – кластера II (П6, П9), умеренным – кластера IV (П1, П2), слабым – кластера I (П7, П10), что вполне увязывается с морфолого-генетическими признаками пирогенных торфяных субстратов соответствующих кластеров. С силой пожара сочетается количество зольных веществ: $III_{63,6} > II_{51,3} > IV_{46,9} > I_{37,4}$ (нижний индекс – зольность, %), плотность торфяного субстрата: $III_{0,36} > II_{0,27} > IV_{0,25} > I_{0,23}$ (г/см³), и величина рН: $III_{7,6} > II_{7,4} > IV_{7,2} > I_{6,8}$. Такое неравномерное распределение силы огневого воздействия в пределах экспериментального полигона соответствует высокой рассредоточенности лесных и торфяных пожаров по площади горения.

Независимо от интенсивности теплового воздействия трансформация свойств пирогенных торфяных почв по профилю сохраняет единую закономерность: с глубиной последовательно снижается содержание органического углерода, повышается зольность торфяного субстрата, плотность сложения и величина рН (табл. 5). Эти закономерности, согласно М. А. Софронова, А. В. Волокитиной [2012] и X. Huang, G. Rein [2017], можно объяснить тем, что в нижние слои торфяной залежи поступает тяжелый атмосферный воздух, который активно реагирует с горящим торфом. В верхнюю толщу возгоняются продукты пиролиза, а также углекислый и угарный газы, препятствуя доступу кислорода и снижая интенсивность тления.

При сходной направленности качественных изменений различная интенсивность воздействия лесоторфяного пожара выявляется на количественном уровне – глубине трансформации торфяной залежи и потерь углерода. Степень преобразования оценивали путем сравнения с физико-химическими показателями эвтрофных почв болотного ель-

**Содержание углерода и физико-химические показатели кластеров эвтрофных пироторфяных почв
положительных элементов микрорельефа**

Глубина горизонта, см	Углерод, %	Зольность, %	pH _{H₂O}	Объемная влажность, %	Объемная масса, г/см ³
Кластер I (участки П7, П10)					
0-4	<u>34,37</u> 29,62-37,71	<u>27,56</u> 21,25-36,54	<u>6,0</u> 5,8-6,1	<u>38,06</u> 36,25-39,88	<u>0,169</u> 0,167-0,171
4-15	<u>36,09</u> 32,94-38,94	<u>24,31</u> 18,92-30,27	<u>6,7</u> 6,5-6,9	<u>41,88</u> 33,25-51,73	<u>0,178</u> 0,140-0,205
15-22	<u>17,05</u> 8,22-23,97	<u>60,31</u> 47,23-76,99	<u>7,5</u> 6,9-7,8	<u>32,02</u> 24,60-42,35	<u>0,333</u> 0,305-0,361
Среднее, 0-22	29,17	37,39	6,8	37,32	0,227
Кластер II (участки П6, П9)					
0-6	<u>27,24</u> 17,53-32,89	<u>41,04</u> 30,36-59,39	<u>6,8</u> 6,2-7,5	<u>41,01</u> 37,36-44,65	<u>0,190</u> 0,178-0,201
6-17	<u>22,92</u> 17,01-28,60	<u>49,21</u> 38,48-60,38	<u>7,4</u> 7,1-7,8	<u>38,22</u> 31,33-47,06	<u>0,174</u> 0,126-0,247
17-24	<u>15,31</u> 12,08-18,44	<u>63,59</u> 57,67-69,71	<u>8,0</u> 7,8-8,3	<u>44,59</u> 35,69-60,74	<u>0,446</u> 0,133-0,662
Среднее, 0-24	21,8	51,3	7,4	41,27	0,270
Кластер III (участки П3, П4, П5, П8)					
0-6	<u>17,58</u> 13,13-24,33	<u>59,30</u> 46,54-67,71	<u>7,1</u> 6,6-7,7	<u>49,34</u> 42,04-64,94	<u>0,268</u> 0,215-0,332
6-15	<u>15,17</u> 8,40-19,03	<u>63,87</u> 56,57-76,66	<u>7,7</u> 7,5-8,0	<u>53,22</u> 38,95-66,12	<u>0,357</u> 0,263-0,425
15-23	<u>13,23</u> 8,57-18,72	<u>67,52</u> 57,15-76,34	<u>7,9</u> 7,8-8,1	<u>61,23</u> 46,36-76,03	<u>0,425</u> 0,371-0,532
Среднее, 0-23	15,3	63,6	7,6	54,60	0,360
Кластер IV (участки П1, П2)					
0-5	<u>28,52</u> 25,68-32,86	<u>38,62</u> 30,42-44,0	<u>6,4</u> 6,0-6,7	<u>46,73</u> 45,73-47,73	<u>0,220</u> 0,214-0,226
5-16	<u>20,08</u> 17,82-26,01	<u>54,58</u> 43,36-58,86	<u>7,4</u> 7,2-7,7	<u>56,19</u> 49,87-63,65	<u>0,301</u> 0,257-0,323
16-24	<u>17,11</u> 12,66-23,86	<u>62,21</u> 47,13-75,80	<u>7,7</u> 7,6-7,8	<u>59,31</u> 54,80-64,28	<u>0,335</u> 0,287-0,376
Среднее, 0-24	24,1	46,9	7,2	54,08	0,253

П р и м е ч а н и е. Числитель – среднее, знаменатель – лимит.

ника, не затронутого пожаром (контрольный объект – фон), который подробно охарактеризован в прежних публикациях [Ефремова и др., 2015, 2018]. Применили несколько приемов оценки: разность физико-химических показателей в % к фону, кратность их снижения или повышения, а также потери углерода в слое 0–20 см на площади гари (кг/м²).

Расчеты потерь выполнили по следующей формуле:

$$C_{\text{потерь}} = [(C_{\text{фон}} - C_{\text{пир}}) \times H \times d] / 10,$$

где $C_{\text{потерь}}$ – потери углерода, кг/м²; $C_{\text{фон}}$ – фоновое содержание, %; $C_{\text{пир}}$ – содержание

в пироженном торфяном субстрате, %; H – мощность слоя, см; d – фоновая объемная масса, г/см³.

В торфяных почвах болотного ельника содержание углерода составляет 38,5 %, величина pH_{H₂O} – 6,8, зольность – 23,4 %, объемная масса – 0,086 г/см³. Согласно табл. 6, в пироженных почвах кластера I, пройденных слабым огнем, содержание углерода снизилось в 1,3 раза, что соответствует 24 % фона. Абсолютные потери составляют 1,6 кг/м², которые эквивалентны выбросам в атмосферу 5,9 кг/м² CO₂. По мере увеличения интенсивности огневого воздействия последователь-

Оценка влияния теплового воздействия пожара на трансформацию физико-химических свойств азотрофных пироторфяных почв

Индекс кластера	Потери относительно фона				Прирост относительно фона			pH _{H₂O}
	Углерод				Зольность		Плотность	
	Кратность	% к фону	C, кг/м ²	CO ₂ , кг/м ²	кратность	% к фону	кратность	
I	1,3	24,1	1,6	5,9	1,6	59,3	2,2	0
II	1,8	43,4	2,8	10,7	2,2	119,2	3,3	0,6
III	2,5	60,3	4,0	14,8	2,7	171,8	4,3	0,8
IV	1,6	37,4	2,5	9,2	2,0	100,4	2,9	0,4
Среднее	1,8	41,3	2,7	10,2	2,1	112,7	3,2	0,6

но нарастают потери углерода и при сильном пожаре достигают 4,0 кг/м² (60,3 % фона), а эмиссия углекислого газа – 14,8 кг/м². В среднем убыль углерода в слое 0–20 см пирогенных почв повышений составляют 2,7 кг/м², что соответствует 41,3 % его потерь и выбросу в атмосферу 10,2 кг/м² CO₂.

Эти данные отражают убыль углерода в процессе пассивного тления торфяного субстрата – термического распада, вызывающего довольно глубокие изменения органического вещества при относительно низких температурах с участием воды в качестве растворителя и химического агента [Раковский и др., 1959]. Приведенные цифры характеризуют дополнительные потери углерода при пожарах, которые оцениваются в основном по глубине прогорания торфяной толщи. Полученная информация представляется принципиально новой и актуальной в связи с возрастающей ролью парниковых газов в изменении глобального климата, в том числе и в связи с эмиссией CO и CO₂ при пожарах.

Возникает естественный вопрос: не вносят ли фитоценозы пожарища определенные шумы в расчетные данные дополнительных потерь углерода. Обратимся к описанию морфолого-генетических особенностей пирогенных профилей. В почвах, пройденных слабым и умеренным огнем, выделяется подстилка мощностью 3–5 см, которая по видовому составу соответствует моховым подстилкам естественных болотных ельников, т. е. она сформирована до пожара. В почвах, пройденных сильным и средним пожаром, судя по сохранившимся остаткам трав, преимущественно осок, с небольшим включением древесного опада, подстилка образована современными фитоценозами, и ее мощность не превышает

0,5–1,0 см. Такая незначительная мощность не может оказывать принципиального влияния на корректировку расчетов добавочной убыли углерода в процессе тления торфяной залежи.

В отличие от потерь углерода торфяная залежь пожарища обогащается зольными элементами в среднем в 2 раза (113 % к фону) и, судя по объемной массе, уплотняется в 3 раза. Величина pH, тесно положительно детерминированная зольностью торфяного субстрата (R² – 0,75, F – 24,7, p – 0,001), смещается в сторону слабощелочного интервала. Сила огневого воздействия пропорционально дифференцирована. Так, слабый пожар обуславливает повышение зольности на 59 %, сильный – на 172 %, объемной массы – соответственно в 2,2 и 4,3 раза. Промежуточные показатели отражают воздействие пожаров условно умеренной и средней интенсивности. Слабое огневое воздействие не изменяет нейтральную реакцию среды торфяной залежи (pH 6,8), сильное – смещает в сторону щелочной градации (pH 7,6). Значительные изменения химических свойств органогенных пирогенных горизонтов почв и подстилок, сопряженных с силой огневого воздействия, установлены и в горных лесах Прибайкалья [Краснощеков, 2019].

Менее увязаны с силой пожара показатели объемной влажности пирогенных торфяных почв (см. табл. 5). Так, наиболее увлажнены почвы кластеров IV и III (54 %) соседствующих участков (П1 + П2) и (П3 + П4 + П5 + П8), пройденные, однако, пожаром различной интенсивности – умеренным и сильным. Почвы кластеров I и II, менее обводненные (37 и 41 %), также объединяют соседние участки (П7 + П10) и (П6 + П10) и испытали слабое

и среднее огневое воздействие. Вероятнее всего, причина кроется в особенностях ботанического состава торфов (в силу высокой степени разложения не представляется возможным выполнить их идентификацию). Предположительно, почвы кластеров III и IV слагаются в основном растительными остатками повышенной влагоемкости, например мхами. В формировании торфяных почв кластеров I и II могут участвовать менее влагоемкие растения – осоки, вейники, хвощи, папоротники и другие.

ВЫВОДЫ

1. Таким образом, на участке болотного ельника, пройденного около 20 лет тому назад крупным лесоторфяным пожаром, на положительных элементах микрорельефа в процессе пассивного тления горючего материала (механический и химический недожог) сформировались пирогенные торфяные почвы. Площадь гари занята в настоящее время березняком кустарниковым осоково-зеленомошно-гипновым и характеризуется высокой вариацией физико-химических показателей (*C_v* 26–37 %).

2. Выявлено четыре кластера пирогенных почв, предопределенные условно слабым, умеренным, средним и сильным огневым воздействием. В совокупном вкладе химических показателей в разграничение кластеров наибольшая доля принадлежит органическому углероду (83 %), значительно меньшая – объемной влажности (15 %).

3. Пирогенные ряды почв по сравнению с невыгоревшей площадью болотного ельника (фон) содержат, сообразно силе огневого воздействия, в 1,6–2,7 раза больше зольных веществ (фон 23,4 %), значительно (в 2,2–4,3 раза) уплотнены (фон – объемная масса 0,086 г/см³), а величина pH последовательно смещается с 6,8 до 7,6.

4. Установлено, что дополнительные потери углерода в процессе пассивного тления слоя торфяной залежи 0–20 см положительных элементов микрорельефа в зависимости от температуры теплового воздействия составляют 1,6–4,0 кг/м², что эквивалентно выбросам в атмосферу 5,9–14,8 кг/м² CO₂.

ЛИТЕРАТУРА

Агрохимические методы исследования почв. М.: Наука, 1975. 436 с.

- Амосов Г. П. Некоторые особенности горения при лесных пожарах. Л.: ЛенНИИЛХ, 1958. 29 с.
- Гундар С. В. Почвенные пожары в бассейне Нижнего Амура, их профилактика и тушение: автореф. ... дис. канд. с.-х. наук. Красноярск, 1978. 24 с.
- Ефремова Т. Т., Аврова А. Ф., Ефремов С. П. Морфолого-генетические типы подстилок болотных ельников // Сиб. лесн. журн. 2015. № 1. С. 58–73.
- Ефремова Т. Т., Аврова А. Ф., Ефремов С. П. Расчетный метод определения углерода в торфах и моховых подстилках лесных болот по зольности растительного субстрата // Сиб. лесн. журн. 2016. № 6. С. 73–83. doi: 10.15372/SJFS 20160607
- 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
- Качинский Н. А. Физика почвы. М.: Высш. шк., 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.
- Краснощечков Ю. Н. Постпирогенная изменчивость подстилки в горных лесах Прибайкалья // Почвоведение. 2019. № 3. С. 290–303. doi: 10.1134/S0032180X19030080 [Krasnoshchekov Y. N. Postpyrogenic variability of litter in mountain forests of Baikal region // Eur. Soil Sci. 2019. Vol. 52, N 3. P. 258–270. doi: 10.1134/S1064229319030086].
- Курбатский Н. П., Красавина Н. Н., Жданко В. А. Лесные почвенные пожары и борьба с ними. Л., 1957. 32 с.
- Лайком А. О., Голубина О. А. Деградация эвтрофных торфяных почв при пожарах на примере месторождения Таган // Вестн. Том. гос. пед. ун-та. 2013. № 8. С. 137–142.
- Липатов Д. Н., Щеглов А. И., Манахов Д. В., Брехов П. Т. Пространственная неоднородность свойств торфяных почв верховых болот в условиях локального пирогенеза на северо-востоке острова Сахалин // Почвоведение. 2016. № 2. С. 261–274. doi: 10.7868/S0032180X16020076 [Lipatov D. N., Shcheglov A. I., Manakhov D. V., Brekhov P. T. Spatial heterogeneity in the properties of high-moor peat soils under local pyrogenesis in northeastern Sakhalin // Eur. Soil Sci. 2016. Vol. 49, N 2. P. 238–250. doi: 10.1134/S1064229316020071].
- Мелехов И. С., Душа-Гудым С. И., Сергеева Е. П. Лесная пирология: учеб. пособие. М.: ГОУ ВПО МГУД, 2007. 296 с.
- Назимова Д. И., Пономарев Е. И., Коновалова М. Е. Роль высотной основы и дистанционных данных в задачах устойчивого управления горными лесами // Лесоведение. 2020. № 1. С. 3–17. doi: 10.31857/S0024114820010106
- Пономарев Е. И., Харук В. И. Горимость лесов Алтае-Саянского региона в условиях наблюдаемых изменений климата // Сиб. экол. журн. 2016. № 1. С. 38–46. doi: 10.15372/SEJ20160104 [Ponomarev E. I., Kharuk V. I. Wildfire Occurrence in Forests of the Altai-Sayan Region under Current Climate Changes // Contemporary Problems of Ecology. 2016. Vol. 9, N 1. P. 29–36. doi: 10.1134/S 199542551601011X].
- Раковский В. Е., Каганович Ф. Л., Новичкова Е. А. Химия пирогенных процессов. Минск: 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
- Софронов М. А., Волокитина А. В. Пожары в заболоченных лесах Западной Сибири // Гидроморфные лесоболотные экосистемы. Красноярск: ИЛИД, 1986. С. 139–150.
- Софронов М. А., Волокитина А. В. Методика обследования и описания лесных участков, пройденных пожарами. Красноярск: Ин-т леса им. В. Н. Сукачева СО РАН, 2007. 71 с.
- 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, 2012. 42 с.
- Трофимова И. Е., Осипова О. П., Балыбина А. С. Подходы к оценке климатоэкологических ресурсов территории Сибири // Сиб. экол. журн. 2019. № 5. С. 38–549. doi: 10.15372/SEJ20190504 [Trofimova I. E., Osipova O. P., Balybina A. S. Approaches to evaluating climate and ecological resources of Siberia // Contemporary problems of ecology. 2019. Vol. 12, N 5. P. 444–452. doi: 10.1134/S1995425519050111].
- Фуряев В. В. Влияние уровней грунтовых вод на пожарное созревание заболоченных и болотных лесов Кеть-Чулымского междуречья // Вопросы лесной пирологии. Красноярск, 1970. С. 186–220.
- Халафян А. А. STATISTICA 6. Статистический анализ данных: учебник. 3-е изд. М.: ООО “Бином-Пресс”, 2007. 515 с.
- Dyrness C. T., Norum R. A. The effects of experimental fires on black spruce forest floors in interior Alaska // Can. J. Forest Research. 1983. Vol. 13. P. 879–893.
- 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>
- 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 // Can. J. Forest Research. 2005. Vol. 35. P. 2164–2177.
- Miyaniishi K., Johnson E. A. Process and patterns of duff consumption in the mixwood boreal forest // Can. J. Forest Research. 2002. Vol. 32. P. 1285–1295.
- Wieder R. K., Scott K. D., Kamminga K. K., Vile M. A., Vitt D. H., Bone T., Xu B., Benschoter B. W., Bhatti J. S. Postfire carbon balance in boreal bogs of Alberta, Canada // Glob. Change Biol. 2009. Vol. 15. P. 63–81.

Influence of forest-peat fires on soils and carbon losses in the phytogenic hammock of mountain swamps in the South of Central Siberia

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

*Sukachev Institute of Forest SB RAS, Federal Research Center
“Krasnoyarsk Science Center SB RAS”
660036, Krasnoyarsk, Akademgorodok, 50/28
E-mail: efr2@ksc.krasn.ru

The estimation of the contrast the physical and chemical properties and carbon losses of pyrogenic peat soils is given 20 years after the large fire in a swamp spruce forest (*Picea obovata* Ledeb.) located in the valley complexes of small rivers of the Kuznetsk Alatau (Khakassia Republic). The area of the fire at present occupied by shrub-sedge-green moss birch forest (*Betula pubescens* Ehrh.), belonging to the group of short-term-derived postfire grass forests. Pyrogenic peat soils (mechanical and chemical underburning) formed due to passive smoldering – thermal effects below the point of ignition, are characterize by a high variation of physical and chemical parameters (C_v 26–37 %). Using the methods of multidimensional statistical analysis (cluster, discriminant, canonical), four clusters were formed that identify pyrogenic series of peat soils. In the total contribution of chemical indicators to the differentiation of clusters, the largest proportion belongs to organic carbon (83 %), and a much smaller proportion belongs to moisture of peat soil bulk (15 %). Based on the diversity and abundance of fire traces in the profile of pyrogenic peat soils, we conditionally associate them with the effect of light, moderate, medium and high fire severity. In proportion to the fire severity, pyrogenic series of peat soils are 1.6–2.7 times enriched with ash components, the content of which ranges from 18.9 to 77 %, are 2.2–4.3 times compacted – the bulk density reaches 0.147–0.421 g/cm³, the pH value is consistently shifted from 6.8 to 7.6. A new approach is proposed to estimating carbon losses in the process of passive peat smoldering by the difference in the content before and after a fire, which complements the traditional method of accounting by the depth of burning of the peat layer. In the 0–20 cm layer of the pyrogenic peat soils, additional carbon losses range from 1.6 to 4.0 kg/m², which is equivalent to 5.9–14.8 kg/m² of CO₂ emission. Data about the additional loss of carbon at the stage of passive smoldering of the peat substrate are provide for the first time.

Key words: eutrophic peat soils (Hypereutric Sapric Histosol), pyrogenic soil clusters, carbon losses, multidimensional statistical analysis, forest-peat fires.