

УДК 634.445.124+631.44.06+630.43

ПОСТПИРОГЕННАЯ МОЗАИЧНОСТЬ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ И ПОТЕРЬ УГЛЕРОДА В ЛЕСНЫХ ПОЧВАХ ЗАБОЛОЧЕННОЙ ДОЛИНЫ 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, pimenov@ksc.krasn.ru, efr2@ksc.krasn.ru, avrova@ksc.krasn.ru

Поступила в редакцию 15.03.2021 г.

Изучены эутрофные торфяно-истые (Hypereutric Sapric Histosols) пирогенные почвы положительных и отрицательных элементов фитогенного микрорельефа спустя 20 лет после крупного пожара в ельнике зеленомошно-гипновом (*Picea obovata* Ledeb.) восточного макросклона Кузнецкого Алатау. В настоящее время пожарище занято густым березняком (*Betula pubescens* Ehrh.) кустарниково-осоково-зеленомошным. Пирогенные почвы (механический и химический недожег), дифференцированные по элементам (группам) микрорельефа, характеризуются выраженной внутригрупповой пространственной неоднородностью физико-химических свойств (C_V 21–39 %). Однако по средним показателям большинства признаков, кроме влажности, почвы микроповышений и мочажин достоверно не различаются между собой. Содержание зольных веществ находится в пределах 52.5–53.5 %, углерода – 20.4–21.2 %, объемная масса составляет 0.29–0.31 г/см³, объемная влажность – 49–60.8 %, реакция почвенной среды преимущественно слабощелочная. Процесс пассивного тления (ниже точки воспламенения) торфяной залежи сопровождается дополнительной убылью углерода, которую рассчитали непосредственно по элементу с использованием естественного эксперимента до-после пожара. Потери характеризуются высокой вариабельностью (C_V 34–42 %) вследствие разнообразного термического воздействия, обусловленного экологическими факторами и особенностями горения. В пространстве микроповышений объективно выявлен меньший уровень потерь углерода и слабее выражена мозаичность относительно мочажин. Дополнительная убыль углерода – лимиты и среднее (стандартное отклонение) – в пирогенных почвах микроповышений составляют 1.4–4.4; 2.98 ± 1.05 кг/м², в мочажинах – 0.4–5.7; 3.71 ± 1.57 кг/м². На гари в среднем это соответствует 33.5 т/га, что эквивалентно выбросам в атмосферу 122.9 т CO₂/га. Интенсивность потерь углерода в процессе пассивного тления по сравнению с выгоранием торфяной залежи ориентировочно ниже в 3–4 раза.

Ключевые слова: эутрофные пирогенные почвы, пассивное тление, эмиссия CO₂, кластеры почв, многомерный статистический анализ.

DOI: 10.15372/SJFS20210602

ВВЕДЕНИЕ

Микротопография является общим атрибутом болотных экосистем. Развитие пространственного рисунка – самоорганизующийся, прежде всего аутогенный, процесс. Роль аллогенных сил, таких как лесной пожар, в развитии самоорганизующегося микрорельефа и его связь с экосистемными функциями торфяных болот изучены слабо (Benscoter et al., 2015). Отмечается недостаточное осмысление роли торфяных пожаров бореальной зоны при рассмотрении влияния лесных и болотных экосистем на газовый

состав атмосферы и климат (Сирин и др., 2019; Sirin et al., 2020). Оценки такого рода имеют решающее значение для понимания потенциально-го воздействия изменяющейся природной среды и динамики свойств торфяных болот. Лесные болота горного юга Енисейской Сибири практически не охвачены такого рода исследованиями. Между тем с начала 80–90-х годов прошлого столетия происходит неуклонный рост частоты пожаров в средне- и низкогорных темнохвойных и лиственнично-сосновых лесах Приенисейской части Алтае-Саянской горной страны (Пономарев, Харук, 2016; Ponomarev, Kharuk, 2016).

© Ефремова Т. Т., Пименов А. В., Ефремов С. П., Аврова А. Ф., 2021

Заболоченные леса и болота включены в третью группу природной пожарной опасности (Фурьев, 1970). Тем не менее болотные леса с высокополнотными древостоями на дренированных полосах вдоль рек подвержены циклическому воздействию пожаров. Установлено два вида почвенно-торфяных пожаров: подземные и открытые, или «комбинированные» (Курбатский, 1970; Софронов, Волокитина, 1986, 2012). Для почвенных и подземных пожаров наиболее характерно беспламенное горение. В силу наличия водоизбыточных горизонтов пожары на болотах не приводят к полному выгоранию торфяного субстрата и сопровождаются механическим и химическим недожегом (Амосов, 1958). Механический недожег выражает долю горючего материала, не участвующую по каким-либо причинам в горении. Изучение химии пирогенных процессов по мокрому обугливанню торфа в лабораторных опытах показало, что течение процессов термического распада органических соединений происходит при участии воды как растворителя и как химического агента даже при относительно низких температурах (Раковский и др., 1959). Глубина процессов растет с повышением влажности и температуры торфа. Критической является температура 240–260 °С, при которой начинается обугливание, приводящее к полному разложению целлюлозы.

Особенность лесных и торфяных пожаров – их высокая рассредоточенность в пространстве (Мелехов и др., 2007; Сирин и др., 2019; Dyrness, Norum, 1983; Miyaniishi, Johnson, 2002; Kasischke, Johnstone, 2005; Sirin et al., 2020). Между тем сведения о пространственной вариативности 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).

В связи с возрастающей антропогенной эмиссией CO₂ в атмосферу и изменением глобального климата активизировались исследования по оценке потерь органического углерода при пожарах на болотах. Обозначены сложности исчисления убыли углерода и предложены косвенные методы оценки его потерь: а) путем восстановления исходной поверхности по положению корневой шейки пней деревьев, б) по разнице концентраций золы в сгоревшем слое и не затронутых пожаром горизонтах; отмечен

недостаток натуральных данных по убыли углерода, особенно в таежной зоне (Вомперский и др., 2007; Глухова, Сирин, 2018; Pitkänen et al., 1999; Turetsky, Wieder, 2001; Wieder et al., 2009; Huang, Rein, 2017; Glukhova, Sirin, 2018; Hu et al., 2018; и др.). Высказано мнение, что в результате торфяных пожаров в атмосферу может поступать до 15 % всех антропогенных эмиссий углерода (Poulter et al., 2006). При этом традиционно не рассматриваются и не учитываются потери углерода в неполно сгоревшей торфяной толще в процессе пассивного тления. Остается также малоизученным влияние микротопографии торфяной залежи на формирование потоков диоксида углерода в результате термического воздействия ниже точки возгорания.

Цель работы – на примере естественного эксперимента до-после пожара выявить и оценить по элементам микрорельефа пространственную неоднородность физико-химических свойств и потерь углерода в пирогенных почвах корнеобитаемой зоны (0–20 см) вследствие пассивного тления торфяного субстрата.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Объектом исследования послужил торфяной массив (1,8 тыс. га) в долине р. Тунгужуль на абсолютной высоте 622 м восточного макросклона Кузнецкого Алатау. Заболоченная долина, занята разновозрастным зеленомошно-гипновым ельником (*Picea obovata* Ledeb.) (рис. 1, а).

Сухой весной 1999 г. вблизи д. Усть-Тунгужуль он пройден крупным (более 200 га) торфяным пожаром, комбинированным с верховым. Ко времени обследования (спустя 20 лет) гарь представляет собой с трудом проходимую территорию, занятую густым березняком (*Betula pubescens* Ehrh.) кустарниково-осоково-зеленомошным, заваленную упавшими и обгоревшими стволами деревьев (рис. 1, б). Микрорельеф выражен довольно отчетливо в виде пестрой мозаики микроповышений и мочажин, кочек из осок (*Carex* L.) и мхов в чередовании с валежником. Топография (геометрия) микрорельефа в какой-то мере связана с силой огневого воздействия. Диаметры мочажин и повышений в пределах 1 м с разницей по высоте около 30 см характеризуют участки, слабо затронутые пожаром, судя по небольшим включениям мелких углей с поверхности и хорошо выраженной моховой подстилкой. Элементы микрорельефа шириной 2–4 м и перепадом высот до 50–70 см, содержащие в

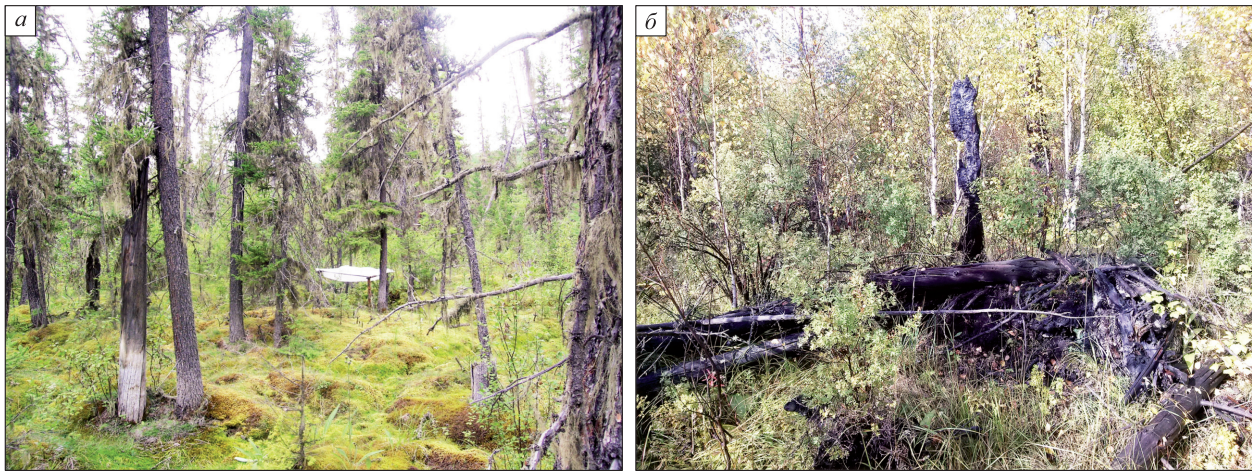


Рис. 1. Фитоценотические комплексы заболоченной долины р. Тунгужуль.

а – ельник зеленомошно-типный, исходный тип лесорастительных условий (фоновый объект); *б* – березняк кустарниково-осоково-зеленомошный, производный, постпирогенный.

профиле залежи прослойки углей, пирогенной золы и углистые примазки, пройденны со всей очевидностью относительно сильным пожаром.

Видовое разнообразие растительного покрова гари отличается высоким уровнем сходства, что свидетельствует о согласованности процессов восстановительной динамики. Фитогенный микрорельеф характеризуется следующими особенностями видового состава. Положительные элементы (микровышения) высотой 25–57 см занимают примерно 30–45 % площади и формируются мхами – аулакомниумом болотным (*Aulacomnium palustre* (Hedw.) Schwägr.), плевроциумом Шребера (*Pleurozium schreberi* (Brid.) Mitt.), гилокомиумом блестящим (*Hylocomium splendens* (Hedw.) Schimp.) и др. Субдоминантами выступают осока дернистая (*Carex cespitosa* L.), покрытие которой достигает 20–30 %, сосюра малоцветковая (*Saussurea parviflora* (Poir.) DC.), вейник Лангсдорфа (*Calamagrostis langsdorffii* (Link) Trin.).

Отрицательные элементы микрорельефа (мочажины) слагаются преимущественно мхами – дрепанокладусами крючковатым (*Drepanocladus uncinatus* (Hedw.) Warnst.), глянцеватым (*D. vernicosus* (Mitt.) Warnst.) и плавающим (*D. fluitans* (Hedw.) Warnst.), каллиэргонами соломенно-желтым (*Calliergon stramineum* (Dicks. ex Brid.) Kindb.) и гигантским (*C. giganteum* (Schimp.) Kindb.), мниумом цинклидиевидным (*Mnium cinclidioides* Huebener), гелодиумом Бландова (*Helodium blandowii* (F. Weber & D. Mohr) Warnst.), некоторыми видами трав, главным образом – осоками двутычинковой (*Carex diandra* Schrank) и сближенной (*C. appropinquata* Schumach.), вахтой трехлистной (*Menyanthes*

trifoliata L.), сабельником болотным (*Comarum palustre* L.) и хвощами болотным (*Equisetum palustre* L.) и приречным (*E. fluviatile* L.).

Торфяная залежь заболоченной долины р. Тунгужуль, испытавшая огневое воздействие, варьирует от мелкоторфянистой мощностью 10–20 см преимущественно в мочажинах до торфяной > 50 см в микровышениях. Она слагается типом эуτροφных торфянистых почв (Hypereutric Sapric Histosols), подтипом пирогенных эуτροφных торфянистых почв – TEPir-TT (Шишов и др., 2004; Мировая реферативная база..., 2017).

Для решения поставленных задач вдоль русла в 25–35 м от береговой линии заложили эколого-пирологическую трансекту (полигон) протяженностью около 300 м (географические координаты 54°14'30.60" с. ш., 89°36'03.10" в. д. – 54°14'24.70" с. ш., 89°35'59.40" в. д.). Так как по флористическому составу площадь гари характеризуется практически полной идентичностью, трансекту случайным образом разбили на 10 участков (секций) в среднем 25–35 м друг от друга. Микровышения оцифрованных участков обозначили индексами П-1, П-2 ... П-9, П-10, мочажины – М-1, М-2 ... М-9, М-10 (рис. 2).

Торфяные почвы отбирались в виде монолитов 35 × 35 × 40 см по элементам микрорельефа в четырех повторностях на каждом из 20 пробных участков. На химический анализ поступали современные почвы преимущественно из корнеобитаемой зоны (0–20 см).

Зольность торфа определялась сжиганием в муфельной печи при температуре 850 °С, значение рН – потенциометрически, объемная масса – методом режущего кольца с шагом

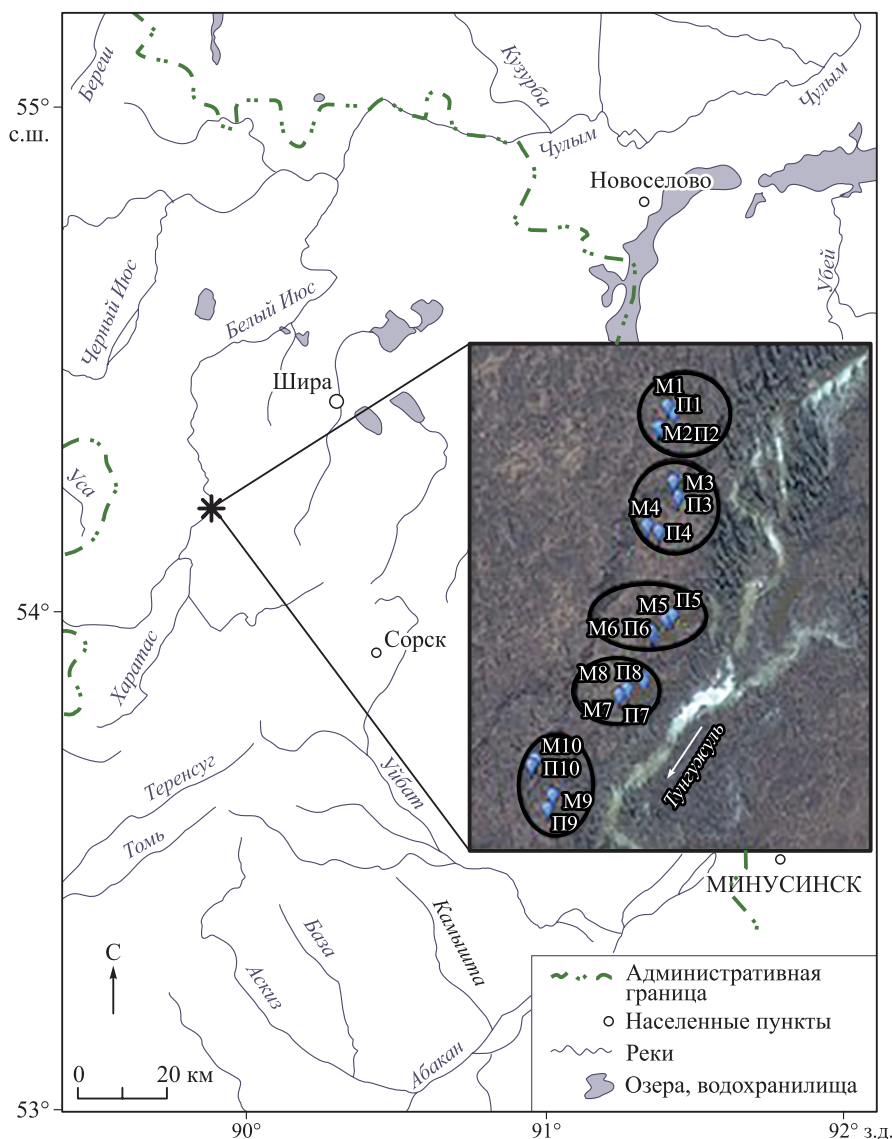


Рис. 2. Изображение на зимнем космическом снимке эколого-пирологической трансекты вдоль русла р. Тунгузюль. Римские цифры – номера участков; М – индекс мочажин, П – микроповышений.

5 см (Агрохимические методы..., 1975), содержание углерода – на элементном анализаторе FLASHTM1112 (производитель Thermo Quest Italia). Многомерный статистический анализ выполнен по руководству А. А. Халафяна (2007).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Морфолого-генетические особенности торфяной залежи, пройденной пожаром. Торфяная залежь повышений и мочажин 0–35 (40) см (до уровня мерзлого водоупора) представляет собой достаточно плотный, преимущественно однородный, хорошо разложившийся субстрат бурого и темно-бурого цвета. Подобные особенности торфяного субстрата в результате

теплового воздействия отмечаются и другими авторами (Giovannini et al., 1986). В том или ином количестве толща включает разнообразные признаки пожара – угли, прослойки пирогенной золы, углистые примазки, обгоревшие остатки древесины. Поверхностные горизонты насыщены живыми корнями и освоены почвенными животными, в основном энхитреидами (Enchytraeidae Vejdovsky). В корненасыщенной зоне торф в разной степени агрегирован и распадается главным образом на зернистые непрочные гумусовой природы отдельности, чаще при нарушении сложения.

За пределами 15–20 см торфяной субстрат, подобно глине, пластичен, что обусловлено, как показано ранее, обогащением пирогенных слоев

воскосмолами – битумами (Efremova, Efremov, 1996). В почвах повышений свойство пластичности обнаруживается нечасто и выражено в слабой степени, в мочажинах – повсеместно и в разных формах проявления. Пирогенный субстрат, скатываясь в шнур, или разрывается при смыкании в кольцо, или обнаруживает трещины, или вовсе не распадается. По всей видимости, причиной служит большая увлажненность мочажин и специфика распространения скрытого подземного пожара в направлении участков с повышенной влажностью до негоримого состояния, как показано в работе (Софронов, Волокитина, 2012). Этими обстоятельствами создаются, вероятнее всего, наиболее благоприятные гидротермические условия формирования воскосмол.

Физико-химическая характеристика современных (0–20 см) торфяных почв, пройденных пожаром. Показатели зольности, объемной влажности, плотности сложения, содержания углерода в пирогенных почвах микроповышений и мочажин отличаются сильной изменчивостью, судя по коэффициентам вариации (C_V) (табл. 1).

Ситуация закономерная: лесные пожары приводят к мозаичному высвобождению зольных элементов, обилие которых считается одним из критериев его интенсивности (Ефремова, Ефремов, 1994; Васильев, 2007; Turetsky, Wieder, 2001; Tuittila et al., 2007; и др.). На площади экспериментального полигона представленное в виде изоплет содержание зольных веществ отражает их пространственную вариабельность по элементам микрорельефа в почвах различных участков (рис. 3, а).

Так, в пирогенных почвах секций 7 и 10 максимум зольных веществ (62–68 %) отмечается в мочажинах, минимум (35–40 %) – в микроповышениях. На других участках торфяной субстрат микроповышений, напротив, отличается более высокой зольностью – 67–69 % (П-3, П-4) относительно 51–58 % (М-3, М-4), а также 45.7 %

(П-9) по сравнению с 31.6 % (М-9). Почвы секций 5 и 6 выделяются практически равным содержанием зольных компонентов по элементам микрорельефа (57–59 %) и сходным на участках 1 и 2 (44–48 %)

Лимиты активной кислотности почв по элементам микрорельефа пожарища (pH_{H_2O} 6.5–7.9) характеризуют реакцию почвенной среды от нейтральной до щелочной, pH_{H_2O} тесно положительно детерминирована зольностью пирогенных почв (R^2 – 0.75, F -критерий – 24.7, p -уровень значимости – 0.001), т. е. напрямую увязывается с распределением минеральных веществ по элементам микрорельефа (рис. 3, б).

Лимиты объемной массы пирогенных торфяных почв положительных и отрицательных элементов микрорельефа практически равны – 0.145–0.436 и 0.177–0.456 г/см³ соответственно.

Подобно реакции среды, плотность на 70 % (F -критерий – 41.2, p -уровень значимости < 0.001) обусловлена зольностью субстрата, т. е. силой огня. Элементы микрорельефа, пройденные пожаром относительно большей силы, судя по зольности, характеризуются максимальной объемной массой и минимальной при слабом тепловом воздействии (рис. 3, в).

Лимиты объемной влажности пирогенных почв микроповышений составляют 35.5–59.8, мочажин – 38.6–75.8 % (рис. 3, г). Почвы положительных элементов микрорельефа дифференцированы по влагосодержанию: первые пять секций экспериментального полигона более влажные – 51.5–59.8 %, последующие менее обводнены – 35.5–41.2 %. Влажность почв отрицательных элементов пожарища менее упорядочена. Можно полагать, что более увлажненные почвы сформированы преимущественно мхами – растениями-торфообразователями повышенной влагоемкости.

Средние показатели физико-химических свойств пирогенных почв характеризуют в той или иной мере их выраженное сходство по элементам микрорельефа (табл. 1). Явно по-

Таблица 1. Средние физико-химические показатели и вариации признаков в зутрофных торфяных пирогенных почвах по элементам микрорельефа

Микро-рельеф	Содержание углерода		Объемная влажность		Зольность		Объемная масса		Актуальная кислотность	
	%	C_V , %	%	C_V , %	%	C_V , %	г/см ³	C_V , %	pH_{H_2O}	C_V , %
М	20.5	33	60.8	25	54.1	24	0.299	33	7.3	7
П	21.2	37	49.0	21	52.5	29	0.290	39	7.3	9

Примечание. М – мочажина, П – микроповышение.

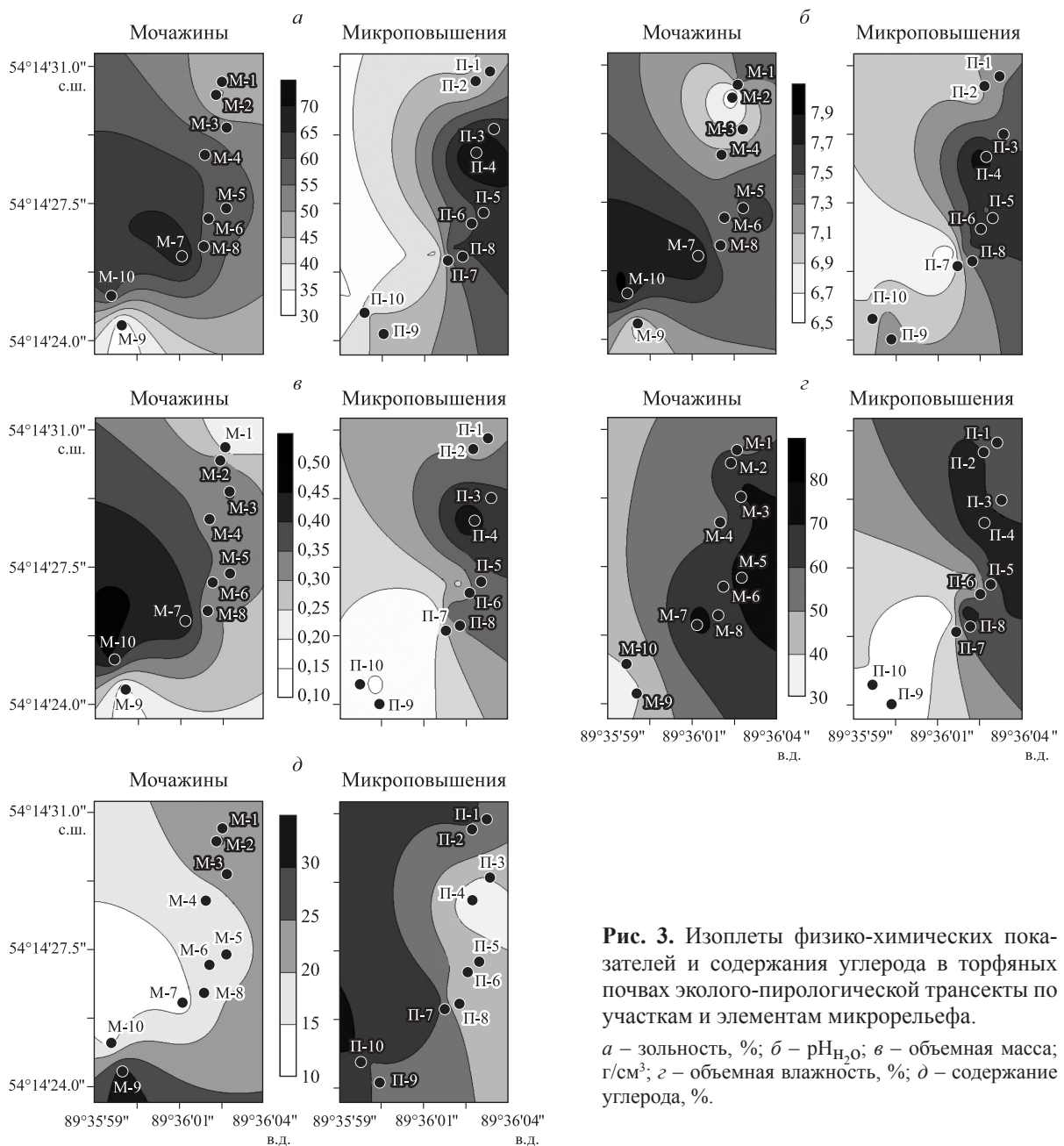


Рис. 3. Изоплеты физико-химических показателей и содержания углерода в торфяных почвах эколого-пирологической трансекты по участкам и элементам микрорельефа.
а – зольность, %; *б* – $\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}}$; *в* – объемная масса; $\text{г}/\text{см}^3$; *г* – объемная влажность, %; *д* – содержание углерода, %.

разному они только увлажнены: объемная влажность микроповышений – 49, мочажин 60.8 %. Статистическую достоверность выявленных особенностей подтвердили методом дискриминантного анализа, используя перечисленные показатели (табл. 2).

Матрица классификации характеризует высокий уровень различия почв микроповышений и мочажин. Итоговое попадание в соответствующую группу составляет 75 %. Высокое качество модели статистически значимо обеспечивается только данными влажности (табл. 3).

Вклад показателей объемной массы – незначителен, данные по зольности, значению pH и содержанию углерода оказываются вне модели.

Содержание углерода и оценка его потерь в процессе пассивного тления торфяного субстрата. Количество углерода в пирогенных торфяных почвах (механический и химическом недожог) позволяет косвенно идентифицировать силу пожара – чем меньше содержание, тем интенсивнее пожар, а также масштабы эмиссии CO_2 в атмосферу

В торфяной толще гари лимиты содержания углерода в микроповышениях составляют 12.7–30.4, в мочажинах – 13.3–32.2 %, коэффициент вариации показателей (C_v) – 33–37 %. Мозаичная концентрация углерода имеет противоположную зольным веществам направленность распределения в пространстве (рис. 3, д), что

Таблица 2. Достоверность различий и матрица классификации пирогенных почв по микроповышениям (П) и мочажинам (М)

Элементы микрорельефа	<i>p</i> -уровень значимости		Матрица классификации, попадания		
	П	М	%	число	
				П	М
П	–	< 0.001	80	32	8
М	< 0.001	–	70	12	28
Итого ...			75	44	36

Таблица 3. Результаты пошагового дискриминантного анализа вклада переменных в кластеризацию пирогенных почв микроповышений и мочажин (качество модели: лямбда Уилкса – 0.732, *F*-критерий – 14.06, *p*-уровень < 0.001)

Переменные модели	Лямбда Уилкса	Частная лямбда	<i>F</i> -критерий	<i>p</i> -уровень	Толерантность (<i>T</i>)	<i>R</i> ² (1 – <i>T</i>)
Объемная влажность, %	0.992	0.738	27.31	< 0.001	0.83	0.17
Объемная масса, г/см ³	0.747	0.981	1.51	0.223	0.83	0.17

вполне логично. Установлена высокой тесноты ($R^2 = 0.93$) отрицательная связь этих показателей и построены высокоточные регрессионные модели прогноза содержания углерода по зольности торфяных залежей (Ефремова и др., 2016). Представленные данные и многолетний опыт по изучению органического вещества торфяных почв (Ефремова, 1992) позволяет с некоторым приближением охарактеризовать силу пожара. Допускаем, что в случае высокозольных торфяников пожар имеет основание называться сильным при содержании углерода менее 13 % в сохранившемся от выгорания торфяном субстрате и его зольности свыше 60 % и слабым, когда углерод составляет свыше 30 % и зольность менее 21 %.

Потери углерода в пирогенных почвах вследствие пассивного тления (ниже точки возгорания) оценили на основе естественного эксперимента. Использовали данные по количеству углерода до пожара (фон) и после (гарь). Фоновый объект – болотный ельник, не затронутый пожаром, расположен в 4 км вверх по руслу р. Тунгжуль и подробно охарактеризован в прежних публикациях (Ефремова и др., 2015, 2018). Фоновое содержание углерода в почвах фитогенных повышений составляет 38.5 %, объемная масса – 0.086 г/см³, в мочажинах – соответственно 33.7 % и 0.139 г/см³.

Убыль углерода в современной торфяной почве (0–20 см) рассчитывали по формуле

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

где $C_{\text{потерь}}$ – убыль углерода, кг/м², $C_{\text{фон}}$ – фоновое содержание, %, $C_{\text{пир}}$ – содержание в пирогенной

почве, %, H – мощность слоя, см, d – фоновая объемная масса, г/см³.

Использование объемной массы почв фонового участка позволило охарактеризовать содержание углерода в слое 0–20 см торфяной залежи как некоторый стандарт естественных местообитаний, что создало возможность оценить потери углерода в случае термического воздействия различной интенсивности. Полученные результаты характеризуют дополнительные потери в процессе пассивного тления торфа и приводятся впервые: традиционно убыль углерода при пожарах оценивается по глубине выгорания торфяной толщи. Лимиты потерь углерода в почвах мочажин составляют 0.4–5.7, среднее (стандартное отклонение) – 3.71 ± 1.57 кг/м², в микроповышениях – 1.4–4.4, среднее 2.98 ± 1.05 кг/м². Отношение максимум/минимум потерь в почвах положительных элементов микрорельефа составляет 3.1, отрицательных – 14.3. Коэффициент вариации в мочажинах – 42, в микроповышениях – 34 %. Согласно приведенным данным, почвы мочажин отличаются от микроповышений сильнее выраженной мозаичностью несколько больших потерь углерода.

Убыль углерода, представленная в виде изоплет, наглядно отражает различия по элементам микрорельефа участков эколого-пирологической трансекты (рис. 4, а).

Неоднородные множества дополнительных потерь углерода, судя по высоким коэффициентам вариации, требуют разделения на элементарные однородные множества. Применили кластерный анализ. Используя алгоритм объединения «древовидная кластеризация» (евклидово

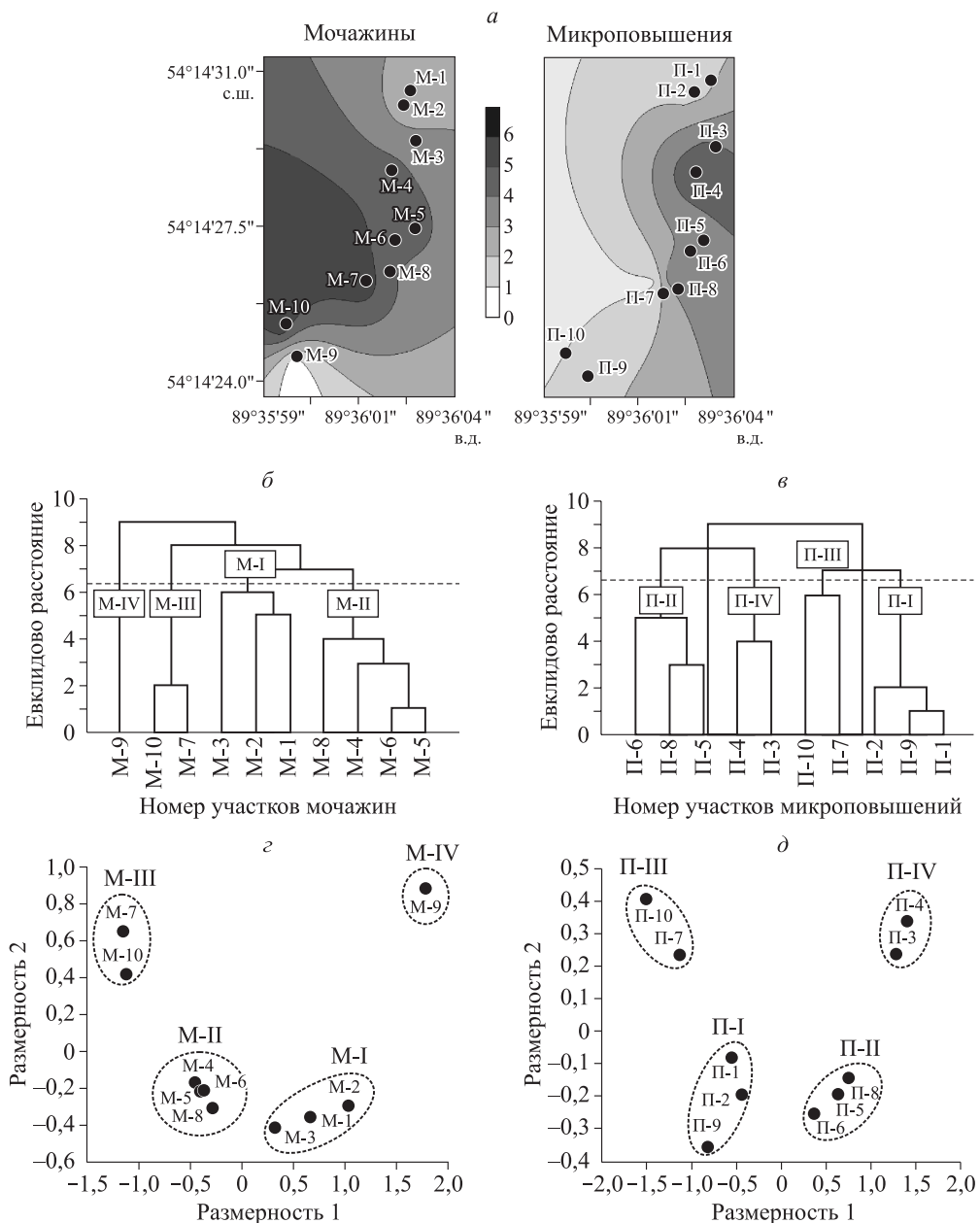


Рис. 4. Изоплеты потерь органического углерода (кг/м²) в пределах пиралогической трансекты (а), кластеризация пирогенных почв участков по элементам микрорельефа (б, в) и размещение кластеров в двумерном пространстве методом многомерного шкалирования (г, д).

Римские цифры – номера кластеров.

расстояние, центроидный метод), организовали потери углерода по элементам микрорельефа в наглядные структуры. Группировка участков пирогенных почв на плоскости приблизительно сходна (рис. 4, б, в). Своеобразие пространства микроповышений – в объединении почв участков П-3 и П-4 в самостоятельный кластер, мочажин – в обособление отрезка трансекты М-9 в отдельный кластер. Последовательность объединения участков методом *K* средних кластеризации, дополнительно использованным, стало

основанием для нумерации сформированных группировок I, II, III, IV.

С помощью дискриминантного анализа оценили, насколько выделенные группировки отличаются друг от друга. Судя по расстоянию Махаланобиса и *p*-уровню значимости, объединенные классы почв достоверно различаются (табл. 4).

По уровню потерь углерода пирогенные почвы мочажин характеризуются 100%-м попаданием в соответствующую группу, доля

Таблица 4. Потери углерода и оценка межгрупповой дисперсии кластеров пирогенных почв микроповышений и мочажин методом дискриминантного анализа

Номер кластера	Квадраты расстояний Махаланобиса, p -уровни				Матрица классификации, попадания					Потери углерода, кг/м ²	
					%	число				С	СО ₂
	I	II	III	IV		I	II	III	IV		
Мочажины											
М-I	—	20	81	49	100	12	0	0	0	2.8	10.1
М-II	< 0.001	—	21	130	100	0	16	0	0	4.2	15.5
М-III	< 0.001	< 0.001	—	253	100	0	0	8	0	5.7	20.7
М-IV	< 0.001	< 0.001	< 0.001	—	100	0	0	0	4	0.4	1.5
Итого ...					100	12	16	8	4		
Микроповышения											
П-I	—	17	9	51	100	12	0	0	0	2.4	8.8
П-II	< 0.001	—	52	9	92	1	11	0	0	3.5	12.8
П-III	< 0.001	< 0.001	—	104	88	1	0	7	0	1.6	5.9
П-IV	0.001	0.006	< 0.001	—	100	0	0	0	8	4.3	15.8
Итого ...					95	14	11	7	8		

Примечание. Квадраты расстояний Махаланобиса – над чертой, p -уровни значимости различий – под чертой.

корректно классифицированных наблюдений в кластерах фитогенных повышений находится в пределах 88–100 %. С использованием квадратов расстояния Махаланобиса методом многомерного шкалирования участки пирогенных почв разместили на плоскости по элементам микрорельефа. Расположение кластеров микроповышений и мочажин в двумерном пространстве однообразно (рис. 4, з, д).

Кластеры I и II сосредоточены в отрицательном поле оси ординат и довольно сходны своей таксономией по элементам микрорельефа. Они близки с определенным допущением и уровнями потерь углерода: кластер М-I – 2.8, П-I – 2.4, кластер М-II – 4.2, П-II – 3.5 кг/м². Кластеры III и IV залегают в положительном пространстве ординат и характеризуют прямо противоположные тенденции убыли углерода по элементам микрорельефа. Идентичные по составу группировки III характеризуют минимум потерь в почвах микроповышений (1.6 кг/м²) и максимум в мочажинах (5.7 кг/м²). Кластеры IV, различающиеся таксономией, показывают наибольшие потери в почвах положительных элементов микрорельефа (4.3 кг/м²) и самые низкие – в отрицательных (0.4 кг/м²).

Средняя убыль углерода в процессе пассивного тления торфяного субстрата составляет 3.35 ± 1.86 кг/м², что эквивалентно выбросам в атмосферу 12.3 кг/м² СО₂. В болотном ельнике заболоченной долины р. Тунгужуль, охваченном пожаром, при термическом воздействии

ниже точки возгорания торфяной залежи потери углерода с площади около 200 га исчисляются 6.7 Мт/га, что эквивалентно 24.5 Мт/га эмиссии СО₂.

С использованием литературных данных выполнена сравнительная ориентировочная оценка потерь углерода в процессе пассивного тления и выгорания торфяной залежи. Показано: лесоторфяной пожар в Московской области вызвал прогорание в среднем от 13–15 до 20 ± 9 см толщи, что соответствует потерям углерода в пределах 8.6–12.9, в среднем 9.8 кг/м² (Сирин и др., 2019; Sirin et al., 2020). Наши оценки потерь углерода 3.35 кг/м² приводятся для слоя 0–20 см торфа, т. е. материалы в известном приближении сопоставимы. Если соотнести представленные данные, то интенсивность потерь в процессе пассивного тления по сравнению с выгоранием торфяного субстрата ниже в 2.6–3.9 (в среднем в 3) раза.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Эутрофные торфяные пирогенные почвы микроповышений и мочажин как группы элементов микрорельефа характеризуются выраженной внутригрупповой изменчивостью физико-химических свойств ($C_v = 21–37$ %). По средним показателям они характеризуются слабощелочной реакцией среды, в той или иной мере сходны по зольности, плотности, содержанию углерода и различаются влагосодержанием.

Дополнительные потери углерода в процессе пассивного тления торфяной залежи (ниже точки воспламенения), рассчитанные впервые, характеризуются высокой вариабельностью ($C_V = 33-37\%$) и составляют в среднем 3.35 ± 1.86 кг/м². Пирогенные почвы, организованные в кластеры, отражают более равномерное распределение и меньший уровень потерь углерода в пространстве микроповышений лимиты, среднее (стандартное отклонение) $1.4-4.4$; 2.98 ± 1.05 против $0.4-5.74$; 3.71 ± 1.57 кг/м² в мочажинах. С площади гари (около 200 га) заболоченной долины р. Тунгужуль дополнительная убыль углерода составила 6.7 Мт/га, что эквивалентно выбросам в атмосферу 24.5 Мт/га CO₂.

Интенсивность потерь углерода в процессе пассивного тления относительно выгорания торфяной залежи ниже ориентировочно в 3–4 раза.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ (REFERENCES)

- Агрохимические* методы исследования почв. М.: Наука, 1975. 656 с. [*Agrokhimicheskie metody issledovaniya pochv (Agrochemical methods of soil studies)*. Moscow: Nauka (Science), 1975. 656 p. (in Russian)].
- Амосов Г. А.* Некоторые особенности горения при лесных пожарах. Л.: ЛенНИИЛХ, 1958. 30 с. [*Amosov G. A. Nekotorye osobennosti gorenija pri lesnykh pozharakh (Some features of burn at the forest fires)*. Leningrad: LenNIILKH, 1958. 30 p. (in Russian)].
- Васильев С. В.* Лесные и болотные ландшафты Западной Сибири. Томск: Изд-во науч.-тех. лит-ры, 2007. 276 с. [*Vasil'ev S. V. Lesnye i bolotnye landshafty Zapadnoy Sibiri (Forest and swamp landscapes of Western Siberia)*. Tomsk: Izd-vo nauch.-tekh. lit-ry (Publ. house Sci. and Techn. literature), 2007. 276 p. (in Russian)].
- 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 [*Vomperskiy S. E., Glukhova T. V., Smagina M. V., Kovalev A. G. Usloviya i posledstviya pozharov v sosnyakakh na osushennykh bolotakh (The conditions and consequences of fires in pine forests on drained bogs)* // *Lesovedenie (For. Sci.)*. 2007. N. 6. P. 35–44 (in Russian with English abstract)].
- Глухова Т. В., Сирин А. А.* Потери почвенного углерода при пожаре на осушенном лесном верховом болоте // *Почвоведение*. 2018. № 5. С. 580–588 [*Glukhova T. V., Sirin A. A. Poteri pochvennogo ugleroda pri pozhare na osushennom lesnom verkhovom bolote (Losses of soil carbon upon a fire on a drained forested raised bog)* // *Pochvovedenie (Soil Sci.)*. 2018. V. 5. N. 5. P. 580–588 (in Russian with English abstract)].
- Ефремова Т. Т.* Структурообразование в торфяных почвах. Новосибирск: Наука, 1992. 191 с. [*Efremova T. T. Strukuroobrazovanie v torfyanykh pochvakh (Structure formation in peat soils)*. Novosibirsk: Nauka (Science), 1992. 191 p. (in Russian)].
- Ефремова Т. Т., Ефремов С. П.* Торфяные пожары как экологический фактор развития лесоболотных экосистем // *Экология*. 1994. № 5. С. 27–34 [*Efremova T. T., Efremov S. P. Torfyanye pozhary kak ekologicheskiy faktor razvitiya lesobolotnykh ekosistem (Peat fires as an ecological factor in the development of forest-swamp ecosystems)* // *Ekologiya (Ecol.)*. 1994. N. 5. P. 27–34 (in Russian with English abstract)].
- Ефремова Т. Т., Аврова А. Ф., Ефремов С. П.* Морфолого-генетические типы подстилок болотных ельников // *Сиб. лесн. журн.* 2015. № 1. С. 58–73 [*Efremova T. T., Avrova A. F., Efremov S. P. Morfologo-geneticheskie tipy podstilk bolotnykh el'nikov (Morphogenetic litter types of bog spruce forests)* // *Sib. lesn. zhurn. (Sib. J. For. Sci.)*. 2015. N. 1. P. 58–73 (in Russian with English abstract)].
- 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 [*Efremova T. T., Avrova A. F., Efremov S. P. Raschetny metod opredeleniya ugleroda v torfakh i mohovykh podstilkakh lesnykh bolot po zol'nosti rastitel'nogo substrata (Calculation method for determination of carbon the peat and moss litter of forest swamps by ash content of plant substrates)* // *Sib. lesn. zhurn. (Sib. J. For. Sci.)*. 2016. N. 6. P. 73–83 (in Russian with English abstract)].
- 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 [*Efremova T. T., Avrova A. F., Efremov S. P. Prostranstvennaya differentsiatsiya sodержaniya ugleroda v torfyanykh pochvakh bolotnykh elnikov vostochnogo makrosklona Kuznetskogo Alatau (Spatial varyety of carbon storages of peat soils of paludified spruce forests on eastern slopes of Kuznetskiy Alatau)* // *Lesovedenie (For. Sci.)*. 2018. N. 4. P. 273–284 (in Russian with English abstract)].
- Курбатский Н. П.* Исследование количества и свойств лесных горючих материалов // *Вопросы лесной пирологии*. Красноярск: Ин-т леса и древесины им. В. Н. Сукачева СО АН СССР, 1970. С. 5–58 [*Kurbatskiy N. P. Issledovanie kolichestva i svoystv lesnykh goryuchikh materialov (The study of the amount and properties of combustible forest materials)* // *Voprosy lesnoj pirologii (Questions of forest pyrology)*. Krasnoyarsk: In-t lesa i drevesiny im. V. N. Sukacheva SO AN SSSR (V. N. Sukachev Inst. For. & Timber Sib. Br. USSR Acad. Sci.), 1970. P. 5–58 (in Russian)].
- Лайком А. О., Голубина О. А.* Деградация эвтрофных торфяных почв при пожарах на примере месторождения Таган // *Вестн. Том. гос. пед. ун-та*. 2013. № 8 (136). С. 137–142 [*Laykom A. O., Golubina O. A. Degradatsiya evtrofnykh torfyanykh pochv pri pozharakh na primere mestorozhdeniya Tagan (Degradation of pyrogen peat soil at fires (data of Tagan Excavation))* // *Vestn. Tom. gos. ped. un-ta (Bull. Tomsk St. Ped. Univ.)*. 2013. N. 8 (136). P. 137–142 (in Russian with English abstract)].
- 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 [*Lipatov D. N., Shcheglov A. I., Manakhov D. V., Brekhov P. T. Prostranstvennaya neodnorodnost' svoystv torfyanykh pochv verkhovykh bolot v usloviyakh lokal'nogo piroge-neza na severo-vostoke ostrova Sakhalin* // *Pochvovedenie*. 2016. № 2. С. 261–274 [Lipatov D. N., Shcheg-

- lov A. I., Manakhov D. V., Brekhov P. T. Prostranstvennaya neodnorodnost svoystv torfyanykh pochv verkhovykh bolot v usloviyakh lokalnogo pirogeneza na severovostoke ostrova Sakhalin (Spatial heterogeneity in the properties of high-moor peat soils under local pyrogenesis in northeastern Sakhalin) // *Pochvovedenie* (Soil Sci.). 2016. N. 2. P. 261–274 (in Russian with English abstract).
- Мелехов И. С., Душа-Гудым С. И., Сергеева Е. П. Лесная пирология: учеб. пособ. М.: МГУЛ, 2007. 296 с. [Melekhov I. S., Dusha-Gudym S. I., Sergeeva E. P. Lesnaya pirologiya: ucheb. posob. (Forest fire science: study guide). Moscow: MGUL (Moscow St. Univ. For.), 2007. 296 p. (in Russian)].
- Мировая реферативная база почвенных ресурсов 2014. Международная система почвенной классификации для диагностики почв и создания легенд почвенных карт. Исправленная и дополненная версия 2015 / Науч. ред. перевода М. И. Герасимова, П. В. Красильников. Переводчик И. А. Спиридонова. М.: Моск. гос. ун-т им. М. В. Ломоносова, сор. 2017. 203 с. [Mirovaya referativnaya baza pochvennykh resursov 2014. Mezhdunarodnaya sistema pochvennoy klassifikatsii dlya diagnostiki pochv i sozdaniya legend pochvennykh kart. Ispravlennaya i dopolnennaya versiya 2015 (World abstract database of soil resources 2014. International soil classification system for diagnostics of soils and the creation of soil map legends. Revised and updated version 2015) / Nauch. red. perevoda M. I. Gerasimova, P. V. Krasilnikov. Perevodchik I. A. Spiridonova (Sci. ed. Transl. M. I. Gerasimova, P. V. Krasilnikov. Translator I. A. Spiridonova). Moscow: Mosk. gos. un-t im. M. V. Lomonosova, sor. 2017 (M. V. Lomonosov Mosk. St. Univ., litter. 2017). 203 p. (in Russian)].
- Пономарев Е. И., Харук В. И. Горимость лесов Алтае-Саянского региона в условиях наблюдаемых изменений климата // Сиб. экол. журн. 2016. Т. 23. № 1. С. 38–46 [Ponomarev E. I., Kharuk V. I. Gorimost' lesov Altae-Sayanskogo regiona v usloviyakh nablyudaemykh izmeneniy klimata (Wildfire occurrence in forests of the Altai-Sayan region under current climate changes) // Sib. Ekol. Zhurn. (Sib. Ecol. J.). 2016. V. 23. N. 1. P. 38–46 (in Russian with English abstract)].
- Раковский В. Е., Каганович Ф. Л., Новичкова Е. А. Химия пирогенных процессов. Минск: АН БССР, 1959. 208 с. [Rakovskiy V. E., Kaganovich F. L., Novichkova E. A. Khimiya pirogennykh protsessov (Chemistry of pyrogenic processes). Minsk: AN BSSR (Acad. Sci. Belarus Sov. Soc. Rep.), 1959. 208 p. (in Russian)].
- 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 [Sirin A. A., Makarov D. A., Gummert I., Maslov A. A., Gul'be Ya. I. Glubina progoraniya torfa i poteri ugleroda pri lesnom podzemnom pozhare (Depth of peat burning and carbon losses from an underground forest fire) // Lesovedenie (For. Sci.). 2019. N. 5. P. 410–422 (in Russian with English abstract)].
- Софронов М. А., Волокитина А. В. Пожары в заболоченных лесах Западной Сибири // Гидроморфные лесоболотные экосистемы. Красноярск: Ин-т леса и древесины им. В. Н. Сукачева СО АН СССР, 1986. С. 139–150 [Sofronov M. A., Volokitina A. V. Pozhary v zabolochennykh lesakh Zapadnoy Sibiri (Fires in swampy forests of Western Siberia) // *Gidromorfnye lesobolotnye ekosistemy* (Hydromorphic forest ecosystems). Krasnoyarsk: In-t lesa i drevesiny im. V. N. Sukacheva SO AN SSSR (V. N. Sukachev Inst. For. & Timber Sib. Br. USSR Acad. Sci.), 1986. P. 139–150 (in Russian)].
- 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. [Sofronov M. A., Volokitina A. V. Rekomendatsii po okhrane ot pozharov yuzhno-taehnykh zabolochennykh lesov Sibiri (Recommendations for fire protection of the swampy forests in Southern taiga of Siberia). Krasnoyarsk: In-t lesa im. V. N. Sukacheva SO RAN (V. N. Sukachev Inst. For. Sib. Br. Rus. Acad. Sci.), 2012. 42 p. (in Russian)].
- 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 [Furyaev V. V. Vliyaniye urovney gruntovykh vod na pozharное созревание zabolochennykh i bolotnykh lesov Ket'-Chulymskogo mezhdurech'ya (Influence of ground water levels on fire maturation of swampy and bog forests of the Ket-Chulyum interfluvium) // *Voprosy lesnoy pirologii* (Questions of forest pyrology). Krasnoyarsk, 1970. P. 186–220 (in Russian)].
- Шишов Л. Л., Тонконогов В. Д., Лебедева И. И. Классификация и диагностика почв России. Смоленск: Ойкумена, 2004. 342 с. [Shishov L. L., Tonkonogov V. D., Lebedeva I. I. Klassifikatsiya i diagnostika pochv Rossii (Classification and diagnostics of soils in Russia). Smolensk: Oykumena, 2004. 342 p. (in Russian)].
- Халафян А. А. Statistica 6. Статистический анализ данных: учеб. 3-е изд. М.: Бином-Пресс, 2007. 512 с. [Halafyan A. A. STATISTICA 6. Statisticheskiy analiz dannykh: ucheb. 3-e izd. (Statistica 6. Statistical data analysis: textbook. 3rd ed.). Moscow: Binom-Press, 2007. 512 p. (in Russian)].
- Benscoter B. W., Greenacre D., Turetsky M. R. Wildfire as a key determinant of peatland microtopography // *Can. J. For. Res.* 2015. V. 45. N. 8. P. 1132–1136.
- Dyrness C. T., Norum R. A. The effects of experimental fires on black spruce forest floors in interior Alaska // *Can. J. For. Res.* 1983. V. 13. N. 5. P. 879–893.
- Efremova T. T., Efremov S. P. Ecological effects of peat fire on forested bog ecosystems // *Fire in ecosystems of boreal Eurasia* / J. G. Goldammer and V. Furyaev (Eds.). Springer Netherlands, 1996. P. 350–357.
- Giovannini G., Lucchesi S., Giacheffi 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.*
- Glukhova T. V., Sirin A. A. Losses of soil carbon upon a fire on a drained forested raised bog // *Euras. Soil. Sci.* 2018. V. 51. N. 5. P. 542–549 (Original Rus. Text © T. V. Glukhova, A. A. Sirin, 2018, publ. in *Pochvovedenie*. 2018. N. 5. P. 580–588).
- Hu Y., Fernandez-Anez N., Smith T. E., Rein G. Review of emission from smouldering peat fire and their contribution to regional haze episodes // *Int. J. Wildland Fire.* 2018. V. 27. Iss. 5. P. 293–312.
- 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. Iss. 11. P. 907–918.

- 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. For. Res.* 2005. V. 35. N. 9. P. 2164–2177.
- 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 // *Euras. Soil. Sci.* 2016. V. 49. N. 2. P. 238–250 (Original Rus. Text © D. N. Lipatov, A. I. Shcheglov, D. V. Manakhov, P. T. Brekhov, 2016, publ. in *Pochvovedenie*. 2016. N. 2. P. 261–274).
- Miyaniishi K., Johnson E. A.* Process and patterns of duff consumption in the mixedwood boreal forest // *Can. J. For. Res.* 2002. V. 32. N. 7. P. 1285–1295.
- Pitkänen A., Turunen J., Tolonen K.* The role of fire in the carbon dynamics of a mire eastern Finland // *Holocene*. 1999. V. 9. Iss. 4. P. 453–462.
- Ponomarev E. I., Kharuk V. I.* Wildfire occurrence in forests of the Altai-Sayan region under current climate changes // *Contemp. Probl. Ecol.* 2016. V. 9. N. 1. P. 29–36 (Original Rus. Text © E. I. Ponomarev, V. I. Kharuk, 2016, publ. in *Sib. Ekol. Zhurn.* 2016. V. 23. N. 1. P. 38–46).
- 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. V. 111. Iss. 6. 11 p.
- Sirin A. A., Makarov D. A., Gummert I., Maslov A. A., Gul'be Ya. I.* Depth of peat burning and carbon losses from an underground forest fire // *Contemp. Probl. Ecol.* 2020. V. 13. N. 7. P. 769–779 (Original Rus. Text © A. A. Sirin, D. A. Makarov, I. Gummert, A. A. Maslov, Ya. I. Gul'be, 2016, publ. in *Lesovedenie*. 2019. N. 5. P. 410–422).
- Tuutila E.-S., Välijärvi M., Laine J., Korhola A.* Quantifying patterns and controls of mire vegetation succession in a southern boreal bog in Finland using partial ordinations // *J. Veget. Sci.* 2007. V. 18. Iss. 6. P. 891–902.
- Turetsky M. R., Wieder R. K.* A direct approach to quantifying organic matter lost as a result of peatland wildfire // *Can. J. For. Res.* 2001. V. 31. N. 2. P. 363–366.
- 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. Iss. 1. P. 63–81.

POSTPYROGENIC MOSAICISM OF PHYSICO-CHEMICAL PROPERTIES AND CARBON LOSSES IN FOREST SOILS OF THE SWAMPY VALLEY OF THE KUZNETSK ALATAU

T. T. Efremova, A. V. Pimenov, S. P. Efremov, A. F. Avrova

*V. N. Sukachev Institute of Forest, Russian Academy of Sciences, Siberian Branch
Federal Research Center Krasnoyarsk Scientific Center, Russian Academy of Sciences, Siberian Branch
Akademgorodok, 50/28, Krasnoyarsk, 660036 Russian Federation*

E-mail: efr2@ksc.krasn.ru, pimenov@ksc.krasn.ru, efr2@ksc.krasn.ru, avrova@ksc.krasn.ru

Eutrophic peat(y) (Hypereutric Sapric Histosols) pyrogenic soils on the hammock and hollow of phytogenic microrelief were studied 20 years after a large fire in the swamp spruce forest (*Picea obovata* Ledeb.) of the eastern macroslope of the Kuznetsk Alatau. Currently, the burned area occupied by dense shrub-sedge-green moss birch forest (*Betula pubescens* Ehrh.). Pyrogenic peat soils (mechanical and chemical underburning), differentiated by elements (groups) of the microrelief, are characterized by a pronounced intra-group spatial heterogeneity of physical and chemical properties (C_v 21–39 %). However, according to the average indicators of most characteristics, except for moisture of peat, the soils of hammock and hollow do not significantly differ from each other. The content of ash substances is in the range of 52.5–53.5 %, carbon – 20.4–21.2 %, the bulk density is 0.29–0.31 g/cm³, the moisture of peat soil bulk is 49–60.8 %, the soil reaction is mainly slightly alkaline. The process of passive smoldering (below the ignition point) of a peat deposit is accompanied by an additional loss of carbon, which was calculated directly from the element using a natural experiment before and after the fire. The loss value is characterized by high variability (C_v 34–42 %) due to a variety of thermal effects caused by environmental factors and fire features. Lower level of carbon loss and its weak mosaicity have been objectively identified for the hammock relative to the hollow. Additional carbon loss – limit, average (standard deviation) is: in pyrogenic soils of hammock 1.4–4.4, 2.98 ± 1.05 , in the hollow – 0.4–5.7, 3.71 ± 1.57 kg/m². On average, this corresponds to 33.5 t/ha in the burned area, which is equivalent to 122.9 t/ha of CO₂ released into the atmosphere. The intensity of carbon losses in the process of passive smoldering is approximately 3–4 times lower compared to the burning of a peat deposit.

Keywords: *eutrophic pyrogenic soils, passive smoldering, CO₂ emissions, soil clusters, multivariate statistical analysis.*

How to cite: *Efremova T. T., Pimenov A. V., Efremov S. P., Avrova A. F.* Postpyrogenic mosaicism of physicochemical properties and carbon losses in forest soils of the swampy valley of the Kuznetsk Alatau // *Sibirskij Lesnoj Zhurnal* (Sib. J. For. Sci.). 2021. N. 6. P. 18–29 (in Russian with English abstract and references).