

УДК 631.417:630*43:630*187:582.478

ВЛИЯНИЕ ЛЕСНЫХ ПОЖАРОВ НА ФОРМИРОВАНИЕ ПРОФИЛЯ ПОДЗОЛОВМ.А. Надпорожская^{1*}, Б.А. Павлов^{2**}, Д.М. Мирин¹, К.Л. Якконен¹, А.М. Седова¹¹Санкт -Пет ербургский госуда рст венный универси тет , Санкт -Пет ербург, Росси йская Федера ция; ²Инст ит ут мерзлот оведе ния им. П.И. Мельникова СО РАН, Якут ск, Росси йская Федера цияЭл. почт а: * *m.nadporozhskaya@spbu.ru*; ** *borispavlo@yandex.ru*

Ст а т ья пост упила в редакцию 03.03.2020; приня т а к печат и 18.03.2020

В последние годы увеличиваются количество и интенсивность лесных пожаров, поэтому все больше внимания уделяется исследованию пирогенных почв. Наряду с другими характеристиками оценивается послепожарный возврат в почву из сгоревших растений и лесных подстилок фосфора, щелочных и щелочноземельных металлов и др., но динамика соединений железа и алюминия изучена мало. Между тем, именно эти элементы определяют ведущие почвообразовательные процессы и продуктивность многих почв, а в особенности подзолов под наиболее пожароопасными сосновыми лесами сухих местообитаний. По литературным и полученным авторами данным проведен сравнительно-географический анализ подзолов на кварцевых песках, в которых одним из важных диагностических признаков является элювиально-иллювиальное распределение соединений полуторных оксидов по профилю. Увеличение частоты лесных пожаров нарушает био-педогенную аккумуляцию полуторных оксидов в профиле подзолов. Высказано предположение, что сорбция на древесных углях и детрите не компенсирует выноса соединений железа и алюминия из профиля подзолов. Обсуждаются проблемы таксономии постпирогенных почв.

Ключевые слова: *лесные пожары, сухие сосновые леса, кварцевые пески, подзолы***THE INFLUENCE OF FOREST FIRES ON THE FORMATION OF THE PROFILE OF PODZOLS**M.A. Nadporozhskaya^{1*}, B.A. Pavlov^{2**}, D.M. Mirin¹, K.L. Yakkonen¹, A.M. Sedova¹¹ Saint-Petersburg State University, Saint Petersburg, Russia; ² P.I. Melnikov Institute of Permafrost, Siberian Branch of the Russian Academy of Science, Yakutsk, RussiaE-mail: * *m.nadporozhskaya@spbu.ru*; ** *borispavlo@yandex.ru*

In recent years, the number and intensity of forest fires has increased and thus more attention is paid to studying the pyrogenic soils. Parameters under study include the post-fire return of phosphorus, alkali and alkaline earth metals, etc. from burnt plants and forest floor to the soil, but the related dynamics of iron and aluminum compounds has been poorly studied. However, these two elements are crucial for soil-forming processes and the productivity of many soils, in particular of the podzols under the most fire-hazardous pine forests in dry habitats. The present analysis comparative geographic is based on literature and original data related to podzols on quartz sand, in which the eluvial-illuvial distribution of sesquioxide compounds along its profile is one of important diagnostic features. An increase in the frequency of forest fires disrupts the bio-pedogenic accumulation of R₂O₃ in podzol profile. It is suggested that sorption on charcoal and detritus does not compensate for the removal of iron and aluminum from the podzol profile. The problems of taxonomy of post-pyrogenic soils are discussed.

Keywords: *aorest fires, dry pine forest, quartz sands, podzols***1. Введение**

Количество, интенсивность и площадь распространения лесных пожаров в последние годы увеличиваются. На территории России ежегодно 15-200 тысяч пожаров повреждают 2-17 млн. га лесных земель, это на порядок больше площади лесов, погибающих от вредителей и болезней, и в пять раз больше площади хозяйственных вырубок [22]. Пожары относят к одному из существенных факторов лесного почвообразования [33; 5; 24; 38; 18; 44]. Все больше внимания уделяется изучению пирогенных почв. Выявлены основные характерные изменения почв лесных гарей. По времени проявления эти изменения можно разделить на две группы: относительно более изученные краткосрочные пирогенные и почти не изученные длительно действующие постпирогенные. Во время пожара под действием высоких температур поверхностные слои почв теряют органическое вещество, погибают корни, беспозвоночные, микроорганизмы и т.д. Наблюдается дистрофикация почв. Сокращается вклад органогенных горизонтов в общий запас почвенного углерода. В почвах лесных гарей улучшается аэрация и интенсифицируются окислительные процессы, аммонификация и нитрификация, возрастают степень разложения внутрипочвенного опада и потери общего углерода [34; 26; 18; 48, 44, 49]. В поверхностных минеральных горизонтах повышается рН, увеличиваются степень насыщенности обменными основаниями, содержание подвижных органических и минеральных соединений [24; 19; 25; 43, 52]. Действие огня изменяет состав форм углерода, увеличивая долю гидрофобных соединений, что отражается на структуре почвенной системы, в частности – биохимическом составе и популяции микроорганизмов [48]. Повышенное содержание водорастворимых соединений в почвах сосняков и ельников сохраняется 10-16 лет после низовых пожаров [18], а сорбция на древесных углях может препятствовать выносу водорастворимых веществ [5;

53]. Масштаб пирогенных изменений лесных почв, краткосрочных и длительных, зависит от первоначальных запасов опада и подстилки, интенсивности и продолжительности горения.

Особенно пожароопасны сухие сосновые леса. На Карельском перешейке влияние низовых пожаров на сосняки на полимиктовых песках формирует стадии восстановительно-деградационных сукцессий: верещатник – брусничник – бруснично-черничник с елью. Низовые пожары возвращают экосистему на более ксероморфную и менее продуктивную стадию [39]. В подзолах на бедных кварцевых песках юга Ленинградской области (ЛЮ) подзолистые горизонты имеют большую мощность, утяжеление гранулометрического состава иллювиального горизонта выражено гораздо меньше, чем на полимиктовых песках. Под действием пожаров сосняки на таких подзолах формируют аналогичные сукцессионные ряды [40], но восстановительные послепожарные сукцессии замедляются.

Сокращение межпожарных периодов ведет к уменьшению плодородия почв и деградации лесных экосистем. Ежегодные низовые пожары в хвойно-широколиственных лесах Амурской области способствуют выносу зольных элементов в аккумулятивные части ландшафтов [6]. В полевых исследованиях [32] и в вычислительных экспериментах с математической моделью [51] показано, что низовые пожары, случающиеся чаще, чем раз в 30 лет, сокращают продуктивность древостоя и запасы органического вещества в почве. Несмотря на большой объем проведенных работ, еще не разработаны критерии оценок повреждения почв лесных гарей [52, 48].

Сосновые леса в России занимают 115,24 млн. га или 16,06% лесопокрытой площади РФ [1]. В регулировании режимов трофности и влажности песчаных почв, на которых в основном распространены сухие сосновые леса, большую роль играют соединения железа и алюминия. Именно эти элементы являются типоморфными для подбуров и подзолов [23]. Ожелезнение почвенного профиля, формирование иллювиально-железистых, иллювиально-железисто-гумусовых горизонтов, способствуют повышению влажности и плодородия лесных почв [39]. Дифференциация соединений полуторных оксидов в профиле подзолов формируется под действием нескольких факторов, из которых пирогенный часто не принимается во внимание.

В подзолах на кварцевых песках типоморфные элементы, железо и алюминий, содержатся в минимальных количествах, поэтому их перераспределение под влиянием внешних факторов может быть критично для обеспечения формирования сорбционных характеристик минеральной фазы и аккумуляции биогенных веществ. Под действием лесных пожаров железо и алюминий из органических форм (фитомассы, детрита и лесной подстилки) переходят в минеральные формы и могут мигрировать в виде растворов и дисперсных частиц по почвенному профилю до выноса в грунтовые воды [24; 6].

Работы, где изучен аспект влияния лесных пожаров на главный диагностический признак подзолов, распределение в почвенном профиле валовых и оксалаторастворимых форм полуторных оксидов, единичны [18; 45].

Настоящее сообщение посвящено анализу последствий лесных пожаров на перераспределение соединений железа и алюминия в профиле подзолов на кварцевых песках.

2. Объекты и методы исследований

Объектом исследований являются подзолы сосновых лесов на кварцевых песках Ленинградской области (ЛЮ), Республики Коми (РК), и Центральной Якутии (ЦЯ), формирующиеся в условиях периодического влияния лесных пожаров (табл. 1).

Номенклатура почв дается по действующей классификации почв России [23] с уточнениями применительно к лесному пирогенезу [41; 10].

Сведения о климате районов исследований приводятся по опубликованным данным [29; 20; 37]. Давность лесных пожаров оценивается по видовому составу живого напочвенного покрова, по старшему возрасту когорты подроста и по изменению количества и ширины годичных колец древесных [12]. Полевые исследования растительных покровов и почв выполнены общепринятыми методами в почвоведении и геоботанике [31; 21]. Пробоподготовка и лабораторные исследования почвенных образцов выполнены в аналитических лабораториях кафедры агрохимии Санкт-Петербургского государственного университета и почвенного института им. В.В. Докучаева по соответствующим методикам [2; 8]. Минералогический анализ песчаных фракций выполнен методом шлихового опробования [2; 37].

3. Результаты исследований и их обсуждение

Подзолы на кварцевых песках формируются на хорошо дренированных субгоризонтальных поверхностях (см. табл. 1).

Климатические показатели районов ключевых участков соответствуют основным условиям протекания подзолистого и альфегумусового процессов. В изученном ряду наиболее теплой и влажной является ЛЮ, наиболее холодными и сухими – РК и ЦЯ. Следствием влияния климата является уменьшение высоты и полноты древостоя, а также изменение видового состава живого напочвенного покрова, а именно увеличение доли лишайников в условиях одиотипных экотопов.

Табл. 1.

Условия и факторы почвообразования в районах исследований

Географическое положение	Растительность	Рельеф	Средняя годовая температура воздуха, °С	Годовая сумма осадков, мм	Коэффициент увлажнения по Н.А. Иванову	Пожар	
						Вид	Давность, годы
Разрез 1-14. Подзол иллювиально-железистый ¹							
Ленинградская область, Лужский район, Толмачево	Сосняк кустарничково-зеленомошный	Ледниковая гряда	+4,0	711	1,9	Низовой	70
Разрез 3-14. Подзол иллювиально-железистый ¹							
Ленинградская область, Курортный район, Молодежное	Сосняк кустарничково-зеленомошный	Дюнный комплекс приморской равнины	+ 5,4	633	1,9	Верховой	>90
Разрез 70. Подзол иллювиально-железистый ²							
Республика Коми, надпойменная терраса р. Вычегда	Сосняк кустарничково-лишайниковый	Дюнный комплекс на речной террасе	-1,3	560	1,3	Низовой	35
Разрез 406. Подзол иллювиально-железистый ²							
Республика Коми, надпойменная терраса р. Печора	Сосняк кустарничково-лишайниковый	Дюнный комплекс на речной террасе	-1,3	560	1,3	Низовой	70
Разрез 8-ТУК-2014. Подзол иллювиально-железистый ненасыщенный мелкоосветленный песчаный ³							
Центральная Якутия. Правобережная терраса р. Вилюй	Парковый сосновый лес бруснично-лишайниковый	Дюнный комплекс тукулана Кызыл Сыр	-8,2	285	0,7	Низовой	23-25
Разрез 13-ТУК-2014. - Подзол иллювиально-железистый ненасыщенный мелкоосветленный песчаный (пирогенный)							
Центральная Якутия. Правобережная терраса р. Вилюй	Горелый участок паркового леса бруснично-лишайникового в 2014 г.	Дюнный комплекс тукулана Кызыл Сыр	-8,2	285	0,7	Низовой	7 дней

Примечания: ¹ [42]; ² [20]; ³ [28].

Установление срока прохождения лесного пожара достаточно сложный методический прием. Природные пожары как характерный элемент динамики и функционирования сухих сосняков возникают от 1-3 до 5-6 раз за жизнь одного поколения древостоя. Лесные пожары – стихийное явление, их действие может проявляться неравномерно в пространстве, поэтому определение срока давности выгорания лесной подстилки и растительности провести непросто. Надёжное датирование низового пожара возможно по сопоставлению числа годичных колец от сердцевины до «пожарного шрама» (то есть до участка ствола с повреждённым при пожаре камбием) с числом годичных колец от сердцевины до неповреждённой при пожаре поверхности ствола [11]. В некоторых случаях давность низового пожара можно определить по анализу хода роста деревьев, по подсчету годичных колец и измерению их ширины. При выгорании лесной подстилки и повреждении тонких корней прирост древесины может замедляться на несколько лет. Уточнение времени пожара проводят также по дополнительным признакам: видовому составу живого напочвенного покрова и возрасту поколений сосен в древостое. Изменения в живом напочвенном покрове в северной тайге наиболее заметны в течение 10-20 лет, но прослеживаются до 30-

60 лет после пожара [11]. В южной тайге послепожарные смены комплексов видов в живом напочвенном покрове проходят быстрее.

Выгорание лишайниково-мохового яруса и подстилки приводит к повышению вероятности прорастания семян сосны, выживанию всходов и формированию хорошо выраженного яруса подроста [9; 13; 14]. При интерпретации этих данных следует принимать во внимание, что не любой пожар приводит к появлению подроста. Обильное семеношение у сосны бывает раз в 2-4 года. При этом первые 5 лет после сильного пожара всходы сосны практически не приживаются, возможно, из-за разрушения комплекса микоризообразующих грибов в почве. Возобновление сосны активно происходит только до восстановления лишайниково-мохового покрова, состоящего из крупных таежно-боровых видов, т.е. до 20-30 лет после пожара. Потом интенсивность появления подроста сосны ослабевает. Во время низовых пожаров средней интенсивности подрост сосны высотой до 2-3 м (10-20 лет) гибнет полностью [9]. Поэтому в случае последовательных пожаров с перерывом менее 20 лет информация о первом пожаре не выявляется. После верховых пожаров формируются разновозрастные сосняки [25].

Согласно проведенному нами геоботаническому обследованию участка Толмачево в ЛО при возрасте основного поколения деревьев 100-120 лет низовой пожар прошел около 70 лет назад, а на участке Молодежное ЛО современный 90-летний древостой вырос по сплошной гари (табл. 1). Этим срокам соответствуют видовое разнообразие живого напочвенного покрова и мощности лесных подстилок, находящиеся на стадиях относительного восстановления и стабилизации: Толмачево – $6,6 \pm 1,1$, Молодежное – $7,8 \pm 1,2$ см (средние по 20 измерениям для каждого участка). В целом эти данные соответствуют приведенным в литературе: средняя мощность лесных подстилок на стадии стабилизации для сосняков зеленомошных $7,5-8,5$ см [15].

В северной тайге европейской части России мощность лесных подстилок в сосняках лишайниковых на стадии стабилизации составляет $2,5-3,5$ см при средней скорости нарастания $0,033$ см/год за первые 60 лет после пожара [15]. В холодном континентальном климате ЦЯ восстановление лесных подстилок сосняков лишайниковых протекает почти с той же скоростью, $0,030$ см/год [36]. Давность пожара в сосняках ЦЯ, определенная по возрасту кустарниковой ольхи, выросшей неподалеку от ключевого участка с разрезом 8 ТУК-2014, составляет 23-25 лет. Мощность лесной подстилки здесь соответствует этому периоду и составляет около $0,7-1,0$ см. На участке соснового леса вблизи разреза 13 ТУК-2014 в сезон обследования прошел беглый низовой пожар, опаливший напочвенный лишайниковый покров и подстилку, мощность которой почти не изменилась и осталась близка мощности подстилки участка 8 ТУК-2014. По мощности лесных подстилок сосняков кустарничково-лишайниковых РК (1 и 2 см) [20], ориентируясь на литературные данные [36; 15], с большой вероятностью можно предположить, что низовые пожары прошли за 30-35 и 65-70 лет до обследования.

Главным диагностическим признаком почв альфегумусового отдела [23] является специфический горизонт, где выражена аккумуляция органического вещества, а также соединений Fe и Al. Для этих почв характерны: кислая реакция всего профиля, ненасыщенность основаниями.

В лесных подстилках сосняков ЛО морфологически выделяются три подгоризонта, различающиеся по степени трансформации опада: слабо разложенный (O'), ферментированный (O'') и гумифицированный (O'''). Под подстилками залегают темно-серые песчаные прослойки с обильными древесными угольками (неравномерной мощности, 1-2 см). В кустарничково-лишайниковых сосняках РК [20] и ЦЯ [28] подстилки слабо дифференцированы по степени разложения опада, меньшей мощности, но также подстилаются песчаными прослойками (около 0,5 см) с обильными древесными угольками. Количество древесных угольков связано с силой и видом прошедших лесных пожаров, а также запасами горючих материалов.

Некоторые подзолистые горизонты также обогащены древесными угольками, из-за этого они приобретают светло-серую окраску. Такие горизонты мы обозначили индексом E_{pit} . В подзолах участка Молодежное ЛО и ЦЯ древесные угли распределены по всей мощности подзолистого горизонта. В подзолах участка Толмачево ЛО и РК подзолистый горизонт делится на две части: верхнюю E_{pit} и нижнюю E (без включений). Для всех изученных подзолов характерно наличие иллювиально-железистых горизонтов, ржаво-бурых тонов разной интенсивности, без включений. По общим морфологическим признакам рассматриваемые почвы сосновых лесов соответствуют диагностическим критериям подтипа иллювиально-железистых подзолов. Наименее морфологическая дифференциация выражена в профилях подзолов ЦЯ. Морфометрические свойства изученных почв сухих сосновых лесов приведены в табл. 2.

В изученных почвах содержание фракции физической глины ($<0,01$ мм) не превышает 5,5% (табл. 3). В песчаных породах всех участков преобладают зерна кварца и полевых шпатов. В песчаных породах участка Толмачево ЛО отмечено также повышенное содержание зерен граната (11%). Все эти минералы устойчивы к химическому выветриванию и механической абразии [37]. Пленки гидроксидов железа на поверхности песчинок песчаных почвообразующих пород, отмеченные на участках ЛО и ЦЯ, маркируют субэральные эоловые стадии их преобразования.

Минералогический состав почвообразующих пород влияет на особенности формирования профиля подзолов. На мономинеральных песках чаще формируются подзолы иллювиально-железистые, на полиминеральных песках – подзолы иллювиально-гумусовые [23]. Железо по кларковому числу среди металлов в земной коре занимает 2 место после алюминия. По А.П. Виноградову кларки Fe_2O_3 – 6,65 %, Al_2O_3 – 15,21% [7], а среднее содержание в почвах Al_2O_3 – 13,46% и Fe_2O_3 – 5,43%

[3]. Эта закономерность отражает соотношение алюминия и железа в земной коре в целом (алюминий на 3-м месте по распространенности, а железо – на четвертом). Количественная диагностика кварцевых песков в геологии и почвоведении различается. В.Д. Тонконовым [35] было предложено разделять почвообразующие пески на группы по содержанию средней суммы валовых полуторных оксидов: 6,1% - для кварцевых и 16,6% - для полиминеральных песков.

Табл. 2.

Мощность генетических горизонтов почв сухих сосновых лесов, см

Тип леса	Лесная подстилка			a _h	E _{pir} /E	V _f (B _i)
	O'	O''	O'''			
<i>Разрез 1-14. Подзол иллювиально-железистый</i>						
Сосняк кустарничково-зеленомошный	0-2	2-5	5-7	(1-2)	7-10/10-15	17-36
<i>Разрез 3-14. Подзол иллювиально-железистый</i>						
Сосняк кустарничково-зеленомошный	0-2	2-6	6-9	(1-3)	/9-16	19-23 ВНФ 23-45
<i>Разрез 70. Подзол иллювиально-железистый</i>						
Сосняк кустарничково-лишайниковый	0-2			следы	2-10/10-17 (28)	17 (28)-30 (37)
<i>Разрез 406. Подзол иллювиально-железистый</i>						
Сосняк кустарничково-лишайниковый	0-1			следы	1-3/3-9(22)	9 (22)-35
<i>Разрез 8-ТУК-2014. Подзол иллювиально-железистый ненасыщенный мелкоосветленный песчаный</i>						
Парковый сосновый лес бруснично- лишайниковый	0-3			(0,5)	/3-9	10-30
<i>Разрез 13-ТУК-2014. Подзол иллювиально-железистый ненасыщенный мелкоосветленный песчаный (пирогенный)</i>						
Горелый участок паркового соснового леса бруснично- лишайникового в 2014 г.	-			(0,5)	-	-

Примечание: a_h - прослойка с древесными углями.

Табл. 3.

Минералогический, валовой и гранулометрический составы почвообразующих песчаных пород

Минералогический состав ¹	SiO ₂ , %	Fe ₂ O ₃ , %	Al ₂ O ₃ , %	SiO ₂ /R ₂ O ₃	Физ. глина, %
<i>Разрез 1-14. Подзол иллювиально-железистый</i>					
Кварцево-гранатово-полевошпатовый (74-11- 9)	97,2	0,3	1,4	103	4,3
<i>Разрез 3-14. Подзол иллювиально-железистый</i>					
Кварцево-полевошпатовый (45-40)	84,3	1,0	8,8	15	4,6
<i>Разрезы 70 и 406. Подзолы иллювиально-железистые</i>					
Кварцевый и кварцево-полевошпатовый (нет данных)	89,3	0,7-0,9	4,0-5,0	34-27	2,0-5,0
<i>Разрезы 8-ТУК-2014 и 13-ТУК-2014.</i>					
<i>Подзолы иллювиально-железистые ненасыщенные мелкоосветленные песчаные (в т.ч. числе пирогенный)</i>					
Кварцево-полевошпатовый (75-87 - 5-20) ²	93,0	0,7	1,4	85	4,5-5,5

Примечания: ¹ в скобках приведены доли компонентов минералогического состава в %%; ² данные по [37].

В ряду представленных почв почвообразующих породах (мелко- и среднезернистых кварцевых песках) участков Толмачево ЛО, ЦЯ и РК сумма полуторных оксидов составляет, соответственно: 1,7-2,1-5,9 % (см. Табл. 3 и 4).

Эта сумма достигает 9,8% в песках участка Молодежное ЛО, но при таком же невысоком вкладе Fe₂O₃, около 1%. В целом, все рассматриваемые почвообразующие пески характеризуются пониженным и средним содержанием алюминия и чрезвычайно низким железа и могут быть отнесены к группе кварцевых песков. И.В. Забоева [20] автоморфные почвы на кварцевых песках предлагала выделить в отдельную классификационную форму – литогенный тип подзолов, на которых при дефиците влаги и элементов минерального питания растений развиваются чрезвычайно уязвимые к действию внешних нарушающих факторов сосновые леса. Одним из таких нарушающих факторов являются лесные пожары.

Изученные почвы под сосняками кустарничково-зеленомошными ЛО – сильнокислые, а под сосняками кустарничково-лишайниковыми РК и ЦЯ – среднекислые, и характеризуются невысоким содержанием обменных оснований, что соответствует требованиям классификации подзолов по этим показателям. Содержание подвижных соединений фосфора и калия максимальны в органогенных горизонтах, что маркирует их биогенное накопление и трансформацию при разложении лесной подстилки (табл. 5).

Табл. 4.

Средние оценки содержания (по трем аналитическим определениям, кроме [20]) различных форм соединений железа и алюминия в изученных почвах, % к сухой почве

Глубина, см.	Горизонт	Валовые формы		Оксалатнорастворимые формы		% от валовых форм	
		Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃ окс.	Al ₂ O ₃ окс.	Fe ₂ O ₃ окс.	Al ₂ O ₃ окс.
<i>Разрез 1-14. Подзол иллювиально-железистый</i>							
5-7	O'''	0,33	0,94	0,187	0,190	56,7	20,2
7-10	E _{pir}	0,27	0,85	0,011	0,068	4,1	8,0
10-15	E	0,18	0,80	0,002	0,024	1,1	3,0
40-50	BF	0,40	1,70	0,090	0,230	22,5	13,5
<i>Разрез 3-14. Подзол иллювиально-железистый</i>							
6-9	O'''	0,51	1,93	0,280	0,290	54,9	15,0
9-16	E _{pir}	1,01	8,80	0,019	0,050	1,9	0,6
40-80	BF	1,33	8,80	0,080	0,320	6,0	3,6
<i>Разрез 70. Подзол иллювиально-железистый</i>							
0-2	O	н/о	н/о	0,640	0,475	н/о	н/о
5-10	E _{pir}	н/о	н/о	0,200	0,240	н/о	н/о
10-17	E	н/о	н/о	0,160	0,190	н/о	н/о
17-30	BF	н/о	н/о	0,810	0,580	н/о	н/о
<i>Разрез 406. Подзол иллювиально-железистый</i>							
0-1	O	н/о	н/о	0,230	0,603	н/о	н/о
1-3	E _{pir}	0,65	2,44	0,180	0,310	27,7	12,7
3-9	E	0,34	2,14	0,070	0,430	20,6	20,1
9-15	BF	1,14	4,11	0,220	1,150	19,3	28,0
<i>Разрез 8-ТУК-2014. Подзол иллювиально-железистый ненасыщенный мелкоцвет лентный песчаный</i>							
2-3	O	0,38	1,91	0,190	0,240	50,0	12,6
3-9	E _{fpir}	0,73	5,30	0,140	0,130	19,2	2,5
10-20	BFH	0,65	4,70	0,120	0,110	18,5	2,3
20-30	BF	0,87	5,80	0,070	0,290	8,0	5,0
<i>Разрез 13-ТУК-2014. Подзол иллювиально-железистый ненасыщенный мелкоцвет лентный песчаный</i>							
3-4	O _{pir}	0,40	1,81	0,162	0,080	40,5	4,4
4-8	E _{fpir}	0,47	3,30	0,060	0,080	12,8	2,4
15-25	BF	0,75	4,50	0,060	0,080	8,0	1,8
30-40	BC	0,57	4,70	0,020	0,080	3,5	1,7

Примечание: н/о – не определено

Послепожарное подщелачивание почв гарей в сосновых лесах РК существенно в первые два года, через 10 лет уже не заметно [45]. На всех рассматриваемых нами ключевых участках сосновых лесов после пожаров прошло больше 20 лет. Но в E_{pir} по сравнению с нижележащим подгоризонтом E повышены содержание обменных оснований, подвижных соединений фосфора и калия за счет сорбции на древесных углях.

Подзолы диагностируются по сочетанию подстилочного, подзолистого и альфегумусового горизонтов и соответствующей иллювиально-иллювиальной дифференциацией содержания силикатных и несилкатных форм полуторных оксидов [23]. После выгорания лесной подстилки полуторные оксиды, аккумулированные в ней, попадают на/в подзолистый горизонт вместе с золой и углями. Отмечено повышение содержания оксалатнорастворимых форм железа и алюминия сразу после низового пожара в иллювиально-железистых подзолах [45]. Поскольку на гарях степень промывания почвы относительно усиливается [6; 18; 44], то и подвижные формы полуторных оксидов могут выноситься из почв гарей.

Масштабы постпирогенного перераспределения соединений железа и алюминия в почвах зависят от различий алюминия и железа по биогенности и химической природе. Например, бактерии активно используют железо в качестве энергетического материала, концентрируя его в новообразованиях, алюминий же накапливается пассивно как минерализационный остаток органического вещества [3]. Показано влияние грибного мицелия на биогенное накопление железа в лесной подстилке [50]. В листьях берез, выросших на трехлетней лесной гари, концентрация железа возросла на 60% по сравнению с контролем, при этом содержание алюминия увеличилось только на 10% [19]. Комплексы железа с гумусовыми

кислотами быстрее осаждаются в почвенном профиле, чем комплексы с алюминием [30]. При этом вынос алюминия может дополнительно возрастать за счет суспензионной миграции [35], особенно на фоне пониженного (<2%) валового содержания Fe₂O₃ [46].

Табл. 5.

Физико-химические свойства изученных почв

Глубина, см.	Горизонт	pH _{H2O}	pH _{KCl}	ГК ¹	Обменные основания, мг-экв/100 г почвы		ППП ² , %	С общ., %	P ₂ O ₅	K ₂ O
					Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺			мг/100 г почвы	
<i>Разрез 1-14. Подзол иллювиально-железистый</i>										
0-2	O'	4,5	3,5	н/о	н/о	н/о	94,4	40,8	11,1	68,8
2-5	O''	4,1	3,2	н/о	н/о	н/о	93,0	39,4	9,8	39,2
5-7	O'''	4,0	3,0	53,0	10,1	4,0	62,6	30,8	5,6	27,7
7-10	E _{rig}	3,9	3,7	4,5	0,3	0,1	1,3	0,6	0,4	1,0
10-15	E	4,5	4,0	0,5	н/о	н/о	0,4	0,2	0,2	0,3
40-50	BF	4,6	4,5	1,0	0,2	0,1	0,8	0,3	3,2	0,7
<i>Разрез 3-14. Подзол иллювиально-железистый</i>										
0-2	O'	4,7	3,8	н/о	н/о	н/о	95,3	40,2	15,4	12,0
2-6	O''	4,5	3,3	н/о	н/о	н/о	92,8	39,0	18,5	65,7
6-9	O'''	4,3	3,1	74,0	25,6	6,0	78,6	27,4	7,8	74,3
9-16	E _{rig}	4,7	4,4	10,0	1,2	0,1	1,5	0,7	1,1	1,2
40-80	BF	5,5	5,4	2,0	0,4	0,1	0,8	0,2	5,3	0,9
<i>Разрез 70. Подзол иллювиально-железистый</i>										
0-2	O	4,1	3,0	86,6	10,6	3,8	78,3	н/о	н/о	86,0
5-10	E _{rig}	4,9	3,8	0,7	0,3	0,3	0,2	0,2	н/о	1,0
10-17	E	4,9	3,9	0,7	0,4	0,4	0,1	0,1	н/о	1,0
17-30	BF	4,8	4,2	1,9	0,3	0,3	0,4	0,4	н/о	7,0
<i>Разрез 406. Подзол иллювиально-железистый</i>										
0-1	O	4,7	3,6	44,0	17,3	13,7	58,9	н/о	23,0	н/о
1-3	E _{rig}	4,9	3,3	4,4	1,3	0,6	3,0	1,1	1,0	н/о
3-9	E	5,1	3,6	0,8	0,3	0,1	0,3	0,2	0,0	н/о
9-15	BF	5,3	3,9	1,7	0,3	0,1	1,2	0,4	3,0	н/о
<i>Разрезы 8-ТУК-2014 и 13-ТУК-2014.</i>										
<i>Подзолы иллювиально-железистые ненасыщенные мелкоцветленные песчаные</i>										
2-3	O	4,2	3,7	н/о	н/о	н/о	85,2	н/о	н/о	н/о
3-9	E _{f_{rig}}	5,4	4,2	7,3	1,9	0,4	5,2	1,4	1,5	5,9
10-20	BF	5,2	4,3	1,7	0,5	0,0	1,0	0,6	1,9	1,3
20-30	BHF	5,2	4,2	2,4	0,1	0,1	0,5	1,9	5,3	1,6
40-50	BC	5,0	4,4	1,2	0,0	0,1	0,5	0,9	3,4	1,1
60-70	C	5,2	4,4	1,0	0,0	0,1	0,4	0,4	3,1	1,1

Примечания: ¹ГК – гидролитическая кислотность, мг-экв./100 г почвы; ²ППП – потеря при прокаливании (550°C); ³Почвы разрезов 8 и 13 ТУК-2014 различаются по давности повреждения пожарами, но сходны по химико-аналитическим характеристикам, поэтому данные приведены только по первому разрезу; н/о – не определено.

Динамика полуторных оксидов в почвах гарей усложняется процессами капиллярного подтягивания почвенных растворов, поглощения и перераспределения по микоризе и корням, а так же возможным аэральным перераспределением минеральных частиц сразу после пожара [47]. Капиллярное подтягивание почвенных растворов выражено тем сильнее, чем ближе к поверхности почвы уровень грунтовых вод. В случае подзолов в сухих сосновых лесах этот процесс может быть выражен очень слабо: вероятно, в период летней жары после дождей может действовать в поверхностных горизонтах. По мере восстановления лесной подстилки в альфегумусовом профиле подзолов устанавливается новое равновесие с факторами среды состояние.

Не все рассмотренные нами подзолы имеют четкую дифференциацию профиля по содержанию полуторных оксидов (рис. 1).

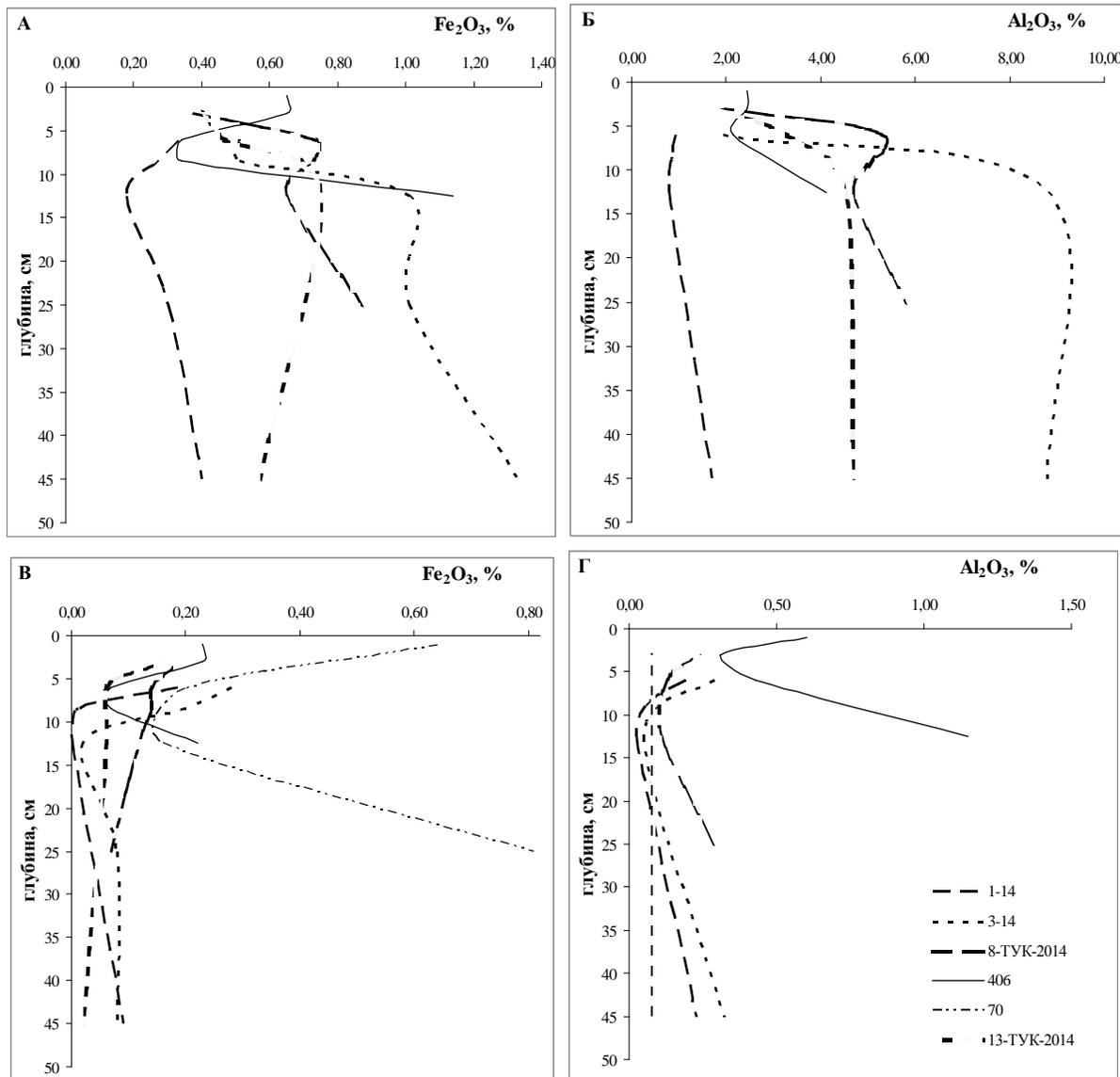


Рис. 1. Распределение по профилям изученных почв: **А** - валовые формы железа, **Б** - валовые формы алюминия; **В** – оксалаторастворимые формы железа, **Г** – оксалаторастворимые формы алюминия.

Условные обозначения: 1-14 – Разрез 1-14. Подзол иллювиально-железистый;
 3-14 – Разрез 3-14. Подзол иллювиально-железистый;
 8-ТУК-2014 – Разрез 8-ТУК-2014. Подзол иллювиально-железистый ненасыщенный мелкоосветленный песчаный;
 70 – Разрез 70. Подзол иллювиально-железистый;
 406 – Разрез 406. Подзол иллювиально-железистый;
 13-ТУК-2014 – Разрез 13-ТУК-2014. Подзол иллювиально-железистый ненасыщенный мелкоосветленный песчаный (пирогенный).

Не выражена или выражена слабо дифференциация валовых форм полуторных оксидов: Молодежное ЛО, где был верховой пожар 90 лет назад и в подзолистом горизонте обильны древесные угольки, 8 ТУК 2014, ЦЯ, где в условиях криоаридного климата межпожарные периоды составляют 20-30 лет). По содержанию оксалаторастворимых форм полуторных оксидов дифференциация не выражена в двух из шести рассмотренных профилей (оба – ЦЯ). Подзолистый горизонт

выделяется во всех описанных профилях (см. Табл. 2), его сероватый цвет *зачастую* обусловлен наличием древесных углей. Помимо этого, восстановительная послепожарная сукцессия может проходить стадию с активизацией травянистых растений в живом напочвенном покрове, затем восстанавливаются кустарнички. В этом случае в подзолистый горизонт поступает опад корней трав и кустарничков. Наличие корней в подзолистом пирогенном горизонте отмечено в монографии И.В. Забоевой [20].

В органогенных горизонтах изученных почв в вытяжку Тамма переходят 30-60% Fe_2O_3 и 4-20 % Al_2O_3 от их валового количества. Доля подвижных соединений железа больше, чем алюминия. Повышенное содержание подвижных соединений полуторных оксидов в лесной подстилке говорит не только об их потенциальной миграционной способности. В лесных подстилках, также как в иллювиальных горизонтах, могут происходить соосаждение и коагуляция комплексов железа, алюминия и фульвокислот. Механизм закрепления гумусовых веществ в лесных подстилках, зависимость этого процесса от содержания полуторных оксидов практически не изучены [41].

В E_{rig} по сравнению с нижележащими E повышено содержание валовых и оксалаторастворимых форм железа, а превышение концентраций валовых и подвижных форм алюминия незначительно или не выражено. Концентрация полуторных оксидов в E_{rig} не выше их содержания в ВФ. В минеральных горизонтах всех рассматриваемых почв преобладают неэкстрагируемые формы полуторных оксидов. Концентрация подвижных соединений алюминия в вытяжке Тамма равна или немногим больше содержания подвижных соединений железа.

Итак, хемогенная дифференциация по содержанию полуторных оксидов выявлена не во всех профилях рассмотренных постпирогенных подзолов. Высказано предположение, что частые природные низовые пожары (раз в 20-30 лет) в криоаридном климате Якутии приводят к ослаблению элювиально-иллювиальной дифференциации вследствие циклического пирогенного обогащения оподзоленных горизонтов золой, угольками и сажой [28]. При периодичности пожаров 70-90 лет в Ленинградской области после низового пожара дифференциация профиля подзолов выражена (участок Толмачево), после верхового пожара – нет (участок Молодежное). Обусловлено ли это особенностями почвообразующих песков или перераспределением соединений полуторных оксидов из-за действия лесных пожаров?

Насколько велико поступление полуторных оксидов с золой в почву по сравнению с их запасами в минеральных горизонтах? По литературным данным мы оценили размеры поступления валовых [30; 20; 29; 26; 27] и оксалаторастворимых форм полуторных оксидов [27] после низового пожара при условии полного выгорания лесной подстилки подзолов соснового леса (табл. 6).

Варьирование запасов оксидов железа и алюминия значительно в ряду представленных почв, что отражает разнообразие исходных данных по качеству почвообразующих пород, полноте и возрасту древостоя, видовому разнообразию напочвенного покрова. В изученной литературе нет сведений о давности и виде прошедших лесных пожаров. В рассмотренных почвах запасы валовых форм железа меньше запасов валовых форм алюминия. Это соответствует пропорции содержания алюминия и железа в земной коре и в почвах. Среднее поступление полуторных оксидов после выгорания лесной подстилки в почву мало по сравнению с их валовыми запасами в подзолистом горизонте. Но по сравнению с запасами оксалаторастворимых форм этих элементов в подзолистом горизонте поступление из выгоревшей подстилки в среднем составляет 20% для Fe_2O_3 и 50% для Al_2O_3 . Мы рассчитали долю соединений железа и алюминия в подстилке от их содержания в подзолистом горизонте, предположив, что все полуторные оксиды подстилки могут после ее сгорания перейти в подвижные формы (табл. 6). Получается, что в среднем после пожара из полностью выгоревшей лесной подстилки в подзолистый горизонт одновременно может поступить 25% от содержащихся там подвижных соединений железа, и 60% - алюминия.

Поступающие после пожара подвижные соединения железа и алюминия не задерживаются в подзолистом горизонте, поскольку его поглощательная способность незначительна, но могут быть сорбированы древесными углями. Учитывая большую миграционную способность соединений алюминия, нельзя исключить и больший его вынос в иллювиальный горизонт и за пределы профиля. Возможно, эти потери невелики на фоне преобладающего содержания соединений алюминия в почве, лесной подстилке и растительном опаде. Железо в рассмотренных подзолах на кварцевых песках дефицитно, его выносу препятствует его большая биогенность. Полученные расчетные характеристики согласуются с полевыми наблюдениями [34]: вынос из профиля ненарушенного иллювиально-железистого подзола составлял 43 и 114 %% железа и алюминия от их поступления с опадом и атмосферными осадками, соответственно.

В работе [16;17] рассмотрены почвы сосновых лесов на песчаных отложениях в юго-восточном Прибайкалье, где вследствие частых низовых пожаров при сохранении взрослого древостоя формируются редкотравно-мертвопокровные редины практически без признаков возобновления молодняка и кустарничков. В этих почвах под влиянием угля снижается кислотность, увеличивается содержания обменного кальция, формируется гуматный тип гумуса. Такие пирогенные почвы предлагают выделить на уровне подтипа: псаммоземы гумусовые, постпирогенные. Почвы в восстанавливающихся сосняках после верхового пожара предложено называть слаборазвитый псаммозем гумусовый.

Полагаем, что несмотря на то, что в профилях подзолов, подвергшихся влиянию пожаров, не всегда ясно выражена дифференциация по валовым и подвижным полуторным оксидам, эти почвы еще не соответствуют характеристикам псаммозема. Псаммоземы, согласно классификации почв России, образуются на песках, подверженным золовым процессам <http://soils.narod.ru/interactive/slab/Slab.html>.

Табл. 6.

Запасы и соотношения валовых и оксалаторастворимых форм полуторных оксидов (Fe₂O₃ и Al₂O₃) в подстилке (О) и подзолистом (Е) горизонтах подзолов иллювиально-железистых, г/м²

Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃
О		Е	
<i>Валовые: среднее по 15 разрезам (минимум – максимум)*</i>			
25±21 (4 – 77)	71±77 (77 – 306)	890±636 (219–2339)	3817±3028 (465 – 3028)
<i>Оксалат ораст воримые: среднее по 5 разрезам (минимум – максимум)**</i>			
8,1±5,2 (2,6 – 15,9)	16,4±7,9 (7,7 – 25,6)	100,6±51,6 (46,8–172,8)	121,0±59,7 (24,0 – 168,0)
<i>Валовые формы в О, в % от валовых форм в Е</i>		Источники данных: * [30; 20; 29; 26; 27]; ** [27]	
2,8 (1,8 – 3,3)	1,9 (1,3 – 3,1)		
<i>Валовые формы в О, в % от оксалат ораст воримых форм в Е</i>			
24,8 (8,5 – 44,8)	58,7 (25,0 – 182,1)		

Так, подзол иллювиально-железистый, с учетом концепции форм гумуса, будет называться на разных стадиях постпирогенной сукцессии: подзол иллювиально-железистый малогумусный, или сухой грубогумусный, или грубогумусный, как это было предложено О.Г. Чертовым с использованием классификации форм гумуса лесных почв [39; 40]. Видовой эпитет дается по мощности и физико-химическим свойствам лесной подстилки на данном этапе сукцессии. Скорость восстановления мощности подстилки определяется факторами внешней среды.

Для обозначения действия пожара, как его силы (верховой, низовой), так и частоты (степень нарушения естественной растительности, ксерофитизация и олиготрофизация почвы) стоит применять наименование «пирогенный» как это предложено в работах А.А. Дымова [18; 45]. Степень пирогенности следует нормировать по количеству и качеству поступивших и сохранившихся древесных углей, сажи, золы и обугленных растительных остатков. Эти вопросы требуют детального обсуждения в научном сообществе. Учет степени нарушения верхних органогенных и органоминеральных горизонтов, разработка детальных таксономических подходов важны для нормирования нагрузок на лесные экосистемы, планирования противопожарных и ~~лесово-почво-~~послепожарных восстановительных мероприятий.

4. Заключение

Низовые пожары, являясь довольно частым полициклическим стимулятором развития сосновых лесов, определяют некоторую самобытность подзолообразовательного процесса на кварцевых песках в таежной зоне. Эта самобытность обусловлена кратковременными бесподстилочными стадиями трансформации почвенных профилей, когда выщелачивание подвижных веществ интенсивнее их биогенной аккумуляции и сорбции горелым детритом и угольками. На этом фоне полуторные оксиды железа и алюминия, являясь основными морфохимическими маркерами подзолообразовательного процесса, в первые годы после низовых пожаров аккумулируются в виде водорастворимых и аморфных форм в элювиальных и иллювиальных горизонтах, а также могут быть вынесены из профиля. Через несколько лет послепожарной регенерации напочвенного растительного покрова, с ростом мощности лесных подстилок постепенно начинает восстанавливаться равновесный с факторами среды химический профиль подзолов по валовым и аморфным формам железа и алюминия.

Полученные материалы свидетельствуют о том, что низовые пожары в сосняках на кварцевых песках в таежной зоне, вероятно, не являются конструктивным фактором почвообразования, поскольку не изменяют его основного морфолого-генетического направления - подзолообразования. Они лишь несколько его корректируют в части частичного или полного уничтожения (выгорания) лесных подстилок и за счет этого относительно быстрого насыщения нижележащих минеральных горизонтов подвижными элементами, которые, регенерируют в процессе послепожарных сукцессий при условии нечастых лесных пожаров.

5. Благодарности

Исследования выполнены при поддержке грантов: РФФИ № 15-04-08707 «Влияние литогенного фактора на трансформацию органического вещества в почвах сосновых лесов» и РФФИ № 15-45-05129 р_востока «Плейстоценовые криопустыни (тукуланы) Центральной Якутии». Авторы выражают благодарность К.А. Бахматовой, Н.П. Битюцкому, Д.Е. Конюшковой и О.Г. Чертову за критические замечания при подготовке рукописи к публикации, Н.В. Ковш и А.Ф. Шаяхметовой за участие в полевых и лабораторных работах.

ЛИТЕРАТУРА

Список русскоязычной литературы

1. Алексеев ВА, Зимницкий ПВ. Статистические данные о биоразнообразии древесных ресурсов России на начало XXI века. СПб.: Санкт-Петербургский лесной экологический центр; 2006.
2. Аринушкина ЕВ. Химический анализ почв и грунтов. М.: МГУ; 1970.

3. Аристовская ТВ. Микробиология подзолистых почв. М.-Л.: Наука; 1965.
4. Бараш ИГ, Буланов ВА, Гладкочуб ДП, Донская ТВ, Иванов АВ, Летникова ЕФ, Миронов АГ, Сизых АИ, Скляров ЕВ. Интерпретация геохимических данных. М.: Интерметинжиниринг; 2001.
5. Безкоровайная ИН, Иванова ГА, Тарасов ПА, Сорокин НД, Богородская АВ, Иванов ВА, Конард СГ, Макрае ДДж. Пирогенная трансформация почв сосняков средней тайги Красноярского края. Сибирский экологический журнал. 2005;12(1):143-152.
6. Брянин СВ. Миграция и аккумуляция зольных элементов в лесных ландшафтах под влиянием периодических пожаров на Амуро-Зейской равнине. Фундаментальные исследования. 2014;(8):859-863.
7. Виноградов АП. Проблемы геохимии и космохимии. Избранные труды. М.: Наука; 1988.
8. Воробьева ЛА. Теория и практика химического анализа почв. М.: Геос; 2006.
9. Герасименко ГГ, Ипатов ВС. Влияние низовых пожаров на развитие сухих сосновых лесов на песчаных почвах. Вестник ЛГУ Сер 3 Биол. 1984;3(1):32-36.
10. Герасимова МИ, Чертов ОГ, Надпорожская МА. Формы гумуса в почвенных классификациях. В кн.: Лесные почвы и функционирование лесных экосистем. Материалы III Всероссийской научной конференции с международным участием. 2019. с. 18-20.
11. Горшков ВВ. Характеристики восстановления лесных экосистем после пожаров. ДАН. 1993;333(6):811-813.
12. Горшков ВВ. Принципы и методы анализа давности и периодичности пожаров. В кн.: Методы изучения лесных сообществ. СПб: ВВМ, 2002. с.201-213.
13. Горшков ВВ, Ставрова НИ. Возрастная структура популяций *Pinus sylvestris* L. в северотаежных лесах с различной давностью пожара. Растительные ресурсы. 2002а;(1):3-24.
14. Горшков ВВ, Ставрова НИ. Динамика возобновления сосны обыкновенной при восстановлении бореальных сосновых лесов после пожаров. Бот журн. 2002;87(2):62-77.
15. Горшков ВВ, Ставрова НИ, Баккал ИЮ. Динамика восстановления лесной подстилки в бореальных сосновых лесах после пожаров. Лесоведение. 2005;(3):37-45.
16. Гынинова АБ, Дыржинов ЖД, Куликов АИ, Гынинова БД, Гончиков БН. Послепожарная эволюция песчаных почв под сосновыми лесами в Прибайкалье. Почвоведение. 2019;(4):451-63.
17. Гынинова АБ, Убугунов ЛЛ, Куликов АИ, Гынинова БД, Гончиков БМ, Бадмаев НБ, Сымпилова ДП. Послепожарная эволюция лесных экосистем на песчаных террасах юго-восточного Прибайкалья. Сибирский экологический журнал. 2020;27(10):13-25.
18. Дымов АА, Дубровский ЮА, Габов ДН. Пирогенные изменения подзолов иллювиально-железистых (средняя тайга, республика Коми). Почвоведение. 2014;(2):144-54.
19. Журкова ИС. Влияние низового пожара на перераспределение химических элементов. Геология и минерально-сырьевые ресурсы Сибири. 2014;3(2):246-50.
20. Забоева ИВ. Почвы и земельные ресурсы Коми АССР. Сыктывкар: Коми книжное издательство; 1975.
21. Ипатов ВС, Мирин ДМ. Описание фитоценоза: методические рекомендации. СПб: ВВМ; 2008.
22. Исаев АС, Коровин ГН. Лес как национальное достояние России. Лесоведение. 2013;(5):5-12.
23. Шишов ЛЛ, Тонконогов ВД, Лебедева ИИ, Герасимова МИ. Классификация и диагностика почв России. Смоленск: Ойкумена; 2004.
24. Краснощеков ЮН, Безкоровайная ИН, Кузьмиченко ВВ. Трансформация свойств лесной подстилки при контролируемом выжигании шелкопрядников в Нижнем Приангарье. Почвоведение. 2007;(2):170-8.
25. Методы изучения лесных сообществ. СПб: СПбГУ; 2002.
26. Морозова РМ. Лесные почвы Карелии. Л.: Наука; 1991.
27. Морозова Р М, Федорец НГ. Современные процессы почвообразования в хвойных лесах Карелии. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН; 1992.
28. Павлов БА, Вариончик СВ, Павлова МР. Подзолы на песках в центральной Якутии. В кн.: Тезисы докладов V Международной. науч. конф.: «Отражение био-гео-антропоферных взаимодействий в почвах и почвенном покрове». Томск: ТГУ; 2015, с. 73-76.
29. Пестряков ВК. Почвы Ленинградской области. Л.: Лениздат; 1973.
30. Пономарева ВВ. Теория подзолообразовательного процесса. М.-Л.: Наука; 1964.
31. Розанов БГ. Морфология почв. М.: Академический проект; 2004.
32. Санников СН. Экологические катастрофы и микроэволюция популяций. Эко-потенциал. 2014;2(6):42-54.
33. Сапожников АП, Карпачевский ЛО, Ильина ЛС. Послепожарное почвообразование в кедрово-широколиственных лесах. Лесной вестник. 2001;(1):132-65.
34. Стрелкова АА, Морозова РМ. О соотношении процессов биогенной аккумуляции и миграции веществ в подзолистых почвах Карелии. Почвоведение. 1979; (6):62-74.

35. Тонконогов ВД. Автоморфное почвообразование в тундровой и таежной зонах Восточно-Европейской и Западно-Сибирской равнин. М.: Почв. ин-т им. В.В. Докучаева; 2010.
36. Тарабукина ВГ, Саввинов ДД. Влияние пожаров на мерзлотные почвы. Новосибирск: Наука (Сибирское отделение); 1990.
37. Урбан АА, Галанин АА, Чжан ТР. Литолого-минералогическая характеристика перевеваемого песчаного комплекса «Кызыл-Сырский». Разведка и охрана недр. 2013;(12): 23-27.
38. Чевычелов АП. География, состав и свойства пирогенно-трансформированных мерзлотных почв Якутии. Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2013;(8):193-196.
39. Чертов ОГ. О гумусе поверхностно-подзолистых лесных почв Карельского перешейка. Почвоведение. 1973;(1):35-42.
40. Чертов ОГ. Экология лесных земель (почвенно-экологическое исследование лесных местообитаний). Л.: Наука; 1981.
41. Чертов ОГ, Надпорожская МА. Формы гумуса: концепции, классификации, перспективы развития и использования. Почвоведение. 2018;(10):1-13.
42. Шаяхметова АФ, Надпорожская МА, Ковш НВ. Трансформация соединений азота в почвах сосновых лесов. Материалы IX Международной Экологической школы-конференции в усадьбе «Сергиевка». СПб.: ВВМ; 2014, с. 290-294.

Общий список литературы / Reference List

1. Alekseev VA, Zimnitskiy PV. Statisticheskie Dannye o Bioraznoobrazii Drevesnykh Resursov Rossii na Nachalo XXI Veka. Saint Petersburg: Sankt-Peterburgskiy Lesnoy Ekologicheskii Tsentr; 2006. (In Russ.)
2. Arinushkina YeV. Khimicheskii Analiz Pochv i Gruntov. Moscow: Moscow State University; 1970. (In Russ.)
3. Aristovskaya TV. Mikrobiologiya Podzolistykh Pochv. Moscow-Leningrad: Nauka; 1965. (In Russ.)
4. Barash IG, Bulanov VA, Gladkochub DP, Donskaya TV, Ivanov AV, Letnikova EF, Mironov AG, Sizykh AI, Sklyarov YeV. Interpretatsiya Geokhimicheskikh Dannyykh. Moscow: Intermetinzhiniring; 2001. (In Russ.)
5. Bezkorovaynaya IN, Ivanova GA, Tarasov PA, Sorokin ND, Bogorodskaya AV, Ivanov VA, Konard SG, McRae DJ. [Pyrogenic transformation of pine stand soil in middle taiga of Krasnoyarsk region]. Sibirskiy Ekologicheskii Zhurnal. 2005;12(1):143-52. (In Russ.)
6. Brianin SV. [Ash elements migration and accumulation in forest landscapes under regular fire impacts on Amur-Zeya plain (Russian Far East)]. Fundamentalnye Issledovaniya. 2014;(8):859-63.
7. Vinogradov AP. Problemy Geokhimii i Kosmokhimii. Izbrannyye trudy. Moscow: Nauka; 1988. (In Russ.)
8. Vorob'eva LA. Teoriya i Praktika Khimicheskogo Analiza Pochv. Moscow: Geos; 2006. (In Russ.)
9. Gerasimenko GG, Ipatov VS. [The influence of ground fires on the development of dry pine forests on sandy soils]. Vestnik LGU Ser 3 Biologiya; 1984;3(1):32-6. (In Russ.)
10. Gerasimova MI, Chertov OG, Nadporozhskaya MA. [Humus forms in soil classifications]. In: Lesnye Pochvy i Funktsionirovanie Lesnykh Ekosistem. Materialy III Vserossiyskoy Nauchnoy Konferentsii s Mezhdunarodnym Uchastiyem. 2019. p. 18-20. (In Russ.)
11. Gorshkov VV. [Characteristics of restoration of forest ecosystems after fires]. Doklady Akademii Nauk. 1993;333(6):811-3. (In Russ.)
12. Gorshkov VV. [Principles and methods for analyzing the duration and frequency of fires]. In: Metody Izucheniya Lesnykh Soobshchestv. SPb: VVM, 2002. p.201-13. (In Russ.)
13. Gorshkov VV, Stavrova NI. [Age structure of *Pinus sylvestris* L. populations in northern taiga forests with different fire ages]. Rastitelnye Resursy. 2002;(1):3-24. (In Russ.)
14. Gorshkov VV, Stavrova NI. [The dynamics of the regeneration of Scots pine during the restoration of boreal pine forests after fires]. Botanicheskii Zhurnal. 2002;87(2):62-77. (In Russ.)
15. Gorshkov VV, Stavrova NI, Bakkal IYu. [Post-fire restoration of forest litter in boreal pine forests]. Lesovedeniye. 2005;(3):37-45. (In Russ.)
16. Gyninova AB, Dyrzhinov ZhD, Kulikov AI, Gyninova BD, Gonchikov BN. [Post-pyrogenic evolution of sandy soils under pine forests in the Baikal Region]. Eurasian Soil Science. 2019;52(4):414-25. (In Russ.)
17. Gyninova AB, Ubugunov LL, Kulikov AI, Gyninova BD, Gonchikov BM, Badmaev NB, Sympilova DP. [Post-fire evolution of forest ecosystems on sandy terraces in the southeastern Baikal region]. Sibirskiy Sibirskiy Ekologicheskii Zhurnal. 2020;27;(10):13-25. (In Russ.)
18. Dymov AA, Dubrovskii YuA, Gabov DN. [Pyrogenic changes in iron-illuvial podzols in the middle taiga of the Komi Republic]. Pochvovedeniye. 2014;(2):144-54. (In Russ.)
19. Zhurkova IS. [Influence of creeping fire on redistribution of chemical elements]. Geologiya i Mineralno-Syryevye Resursy Sibiri 2014;3(2):246-50. (In Russ.)
20. Zaboeva IV. Pochvy i Zemelnye Resursy Komi ASSR. Syktyvkar: Komi Knizhnoe Izdatelstvo; 1975. (In Russ.)
21. Ipatov VS, Mirin DM. Opisanie Fitotsenoza: Metodicheskiye Rekomendatsii. Saint Petersburg: VVM; 2008. (In Russ.)
22. Isaev AS, Korovin GN. [Forests as a national treasure of Russia]. 2013;6(7):677-82. (In Russ.)

23. Shishov LL, Tonkonogov VD, Lebedev AI, Gerasimov MI. Klassifikatsiya i Diagnostika Pochv Rossii. Smolensk: Oykumena; 2004. (In Russ.)
24. Krasnoshchekov YuN, Bezkorovainaya IN, Kuzmichenko VV. [Transformation of forest litter properties under controlled burning of fir forests defoliated by Siberian moths in the Lower Angara River basin]. Pochvovedeniye. 2007;(2):149-57. (In Russ.)
25. Metody Izucheniya Lesnyh Soobshchestv. Saint Petersburg: Saint-Petersburg State University; 2002. (In Russ.)
26. Morozova RM. Lesnye Pochvy Karelii. Leningrad: Nauka; 1991. (In Russ.)
27. Morozova RM, Fedorets NG. Sovremennye Protsessy Pochvoobrazovaniya v Khvoynykh Lesakh Karelii. Petrozavodsk: Karelskiy Nauchnyi Tsentr; 1992. (In Russ.)
28. Pavlov BA, Varionchik SV, Pavlova MR. [Podzols on the sands of Central Yakutia]. In: Tezisy Dokladov V Mezhdunarodnoy Nauchnoy Konferentsii Otrazheniye Bio-Geo-Antroposferykh Vzaimodeystviy v Pochvakh i Pochvennom Pokrove. Tomsk: TGU; 2015. p. 73-6. (In Russ.)
29. Pestryakov VK. Pochvy Leningradskoy Oblasti. Leningrad: Lenizdat; 1973. (In Russ.)
30. Ponomareva V V. Teoriya Podzoloobrazovatel'nogo Protsessa. Moscow-Leningrad: Nauka; 1964. (In Russ.)
31. Rozanov BG. Morfologiya Pochv. Moscow: Akademicheskii Proyekt; 2004. (In Russ.)
32. Sannikov SN. [Environmental catastrophes and microevolution of populations]. Eko-Potentsial. 2014;2(6):42-54. (In Russ.)
33. Sapozhnikov AP, Karpachevskiy LO, Ilyina LS. [Post-fire soil formation in cedar-broadwood forests]. Lesnoy Vestnik. 2001;(1):132-65. (In Russ.)
34. Strelkova AA, Morozova RM. [On the relationships between the processes of biogenic accumulation and migration of substances in podzolic soils of Karelia]. Pochvovedeniye. 1979;(6):62-74. (In Russ.)
35. Tonkonogov VD. Avtomorfnoye Pochvoobrazovaniye v Tundrovoy i Tazhnoy Zonakh Vostochno-Evropeyskoy i Zapadno-Sibirskoy Ravnin. Moscow: Pochvennyi Institut Imeni V.V. Dokuchaeva; 2010. (In Russ.)
36. Tarabukina VG, Savvinov DD. Vliyaniye Pozharov na Merzlotnye Pochvy. Novosibirsk: Nauka; 1990. (In Russ.)
37. Urban AA, Galanin AA, Chzhan TR. [Lithological and mineralogical characteristics of the re-drifted sand complex "Kyzyl-Syrskii"]. Razvedka i Okhrana Nedr. 2013;(12):23-7. (In Russ.)
38. Chevychelov AP. [Geography, composition and properties of pyrogenically transformed permafrost soils of Yakutia]. Mezhdunarodnyi Zhurnal Prikladnykh i Fundamentalnykh Issledovaniy. 2013;(8):193-6. (In Russ.)
39. Chertov OG. [Humus of superficially-podzolic forest soils of Karelian isthmus]. Pochvovedeniye. 1973;(1):35-42. (In Russ.)
40. Chertov OG. Ekologiya Lesnyh Zemel (Pochvenno-Ekologicheskoye Issledovanie Lesnykh Mestoobitaniy). Leningrad: Nauka; 1981. (In Russ.)
41. Chertov OG, Nadporozhskaya MA. [Humus forms: Concepts, classification, and prospects for development and usage]. Pochvovedeniye (10):1142-53. (In Russ.)
42. Shayakhmetova AF, Nadporozhskaya MA, Kovsh NV. [Transformation of nitrogen compounds in the soils of pine forests]. In: Materialy IX Mezhdunarodnoy Ekologicheskoy Shkoly-Konferentsii v Usadbe «Sergiyevka». Saint Petersburg: VVM; 2014. p. 290-4. (In Russ.)
43. Bodi MB, Doerr SH, Cerda A, Mataix-Solera J. Hydrological effects of a layer of vegetation ash on underlying wettable and water repellent soil. Geoderma. 2012;191:14-23.
43. Certini G. Fire as a soil forming factor. Ambio. 2014;43:191-5.
44. Dymov AA, Gabov DN. Pyrogenic alterations of Podzols at the Northeast European part of Russia: Morphology, carbon pools, PAH content. Geoderma. 2015; 241-242: 230-7.
45. Duchaufour Ph, Souchier B. Roles of iron and clay in Genesis of acid soils under a humid, temperate climate. Geoderma. 1978; 20;(1):15-26.
46. Giesler R, Ilvesniemi H, Nyberg L, van Hees P, Starr M, Bishop K, Kareinen T, Lundström US. Distribution and mobilization of Al, Fe and Si in three podzolic soil profiles in relation to the humus layer. Geoderma. 2000;94;(2-4):249-63.
47. Gonzalez-Perez JA, Gonzalez-Vila FJ, Almendros G, Knicker H. The effect of fire on soil organic matter – a review. Environ Int. 2004;30:855-70.
48. Kurth VJ, Hart S C, Ross ChS, Kaye JP, Fulé PZ. Stand-replacing wildfires increase nitrification for decades in southwestern ponderosa pine forests. Oecologia. 2014;175;(1):395-407.
49. Lundstrom US et al. Advances in understanding the podzolization process resulting from a multidisciplinary study of three coniferous forest soils in the Nordic Countries. Geoderma. 2000;94:335-353.
50. Nadporozhskaya MA, Chertov OG, Bykhovets SS, Shaw CH, Maksimova EY, Abakumov EV. Recurring surface fires cause soil degradation of forest land: A simulation experiment with the EFIMOD model. Land Degrad Dev. 2018;29;(7):2222-32.
51. Neary DG, Klopatek CC, DeBano LF, Ffolliott PF. Fire effects on belowground sustainability: a review and synthesis. Forest Ecology and Management. 1999;122:51-71.
52. Wang J, Xiong Zh, Kuzyakov Ya. Biochar stability in soil: meta-analysis of decomposition and priming effects. Bioenergy. 2016;8;(3):512-523.