Картографирование пожарных циклов Печоро-Илычского заповедника

А. С. Плотникова, А. О. Харитонова

Центр по проблемам экологии и продуктивности лесов РАН
Москва, 117997, Россия
E-mail: Alexandra@ifi.rssi.ru

Пожарный режим лесных экосистем определяет условия возникновения, распространения и долговременные последствия пожаров. Одной из его характеристик является пожарный цикл — время, требуемое для выгорания площади леса, равной площади рассматриваемой территории. Определение пожарного цикла важно при анализе тенденций изменения климата и многолетней пожарной активности, оценке эффективности организации противопожарных мероприятий. Целью настоящего исследования является картографирование пожарных циклов Печоро-Илычского заповедника. В качестве исходных данных использованы: история пожаров заповедника начиная со второй половины XIX в. до 2014 г.; данные об очагах пожаров, обнаруженных авиационными и наземными способами мониторинга за период с 1987 по 2011 г.; тематическая карта наземных экосистем, созданная по спутниковым данным Landsat (ETM+ и OLI) по состоянию на 2016 г. Основными этапами картографирования пожарных циклов на локальном уровне являются: выделение границ пространственных единиц; вычисление общей и пройденной огнём за исследуемый временной период площади леса в выделенных границах; расчёт пожарных циклов. В результате исследования созданы карты пожарных циклов на основную часть Печоро-Илычского заповедника для четырёх временных периодов: 1850–1899 гг., 1900–1951, 1952–1999, 2000–2014 гг. Для периода 2000–2014 гг. также проанализирована карта пожарных циклов, полученная в результате исследования российского отделения экологической организации «Гринпис». Результаты настоящего исследования позволяют выявить изменения в пожарных циклах за 150 последних лет. Анализ карт показал, что длительность пожарных циклов определяется не только преобладающим типом леса, но и доступностью территории для населения, в том числе близостью к судоходным рекам, наличием заповедного статуса.

Ключевые слова: пожарный цикл, лесные пожары, Печоро-Илычский заповедник, лесные экосистемы

Одобрена к печати: 06.03.2020
DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-2-123-133

Естественный процесс развития лесных экосистем невозможно рассматривать без учёта пирогенного фактора. Для определения условий возникновения, распространения и долговременных последствий лесных пожаров с учётом лесорастительных, антропогенных и климатических особенностей используют понятие «пожарный режим» (*англ.* fire regime) (Валендик, Иванова, 2001; Швиденко, Щепащенко, 2013; Шешуков и др., 2008; Agee, 1993). Одной из характеристик пожарного режима наряду с частотой возникновения, периодом повторяемости пожаров и степенью повреждения огнём наземной экосистемы является пожарный цикл (Agee, 1993). Пожарный цикл (*англ.* fire cycle — FC) характеризует время, требуемое для выгорания площади леса, равной площади рассматриваемой территории (Frech et al., 1999; Wagner, 1978). Учитывается, что вся площадь целиком может не выгореть в течение этого периода — некоторые участки леса могут гореть несколько раз, в то время как другие не гореть совсем.

Исследователи отмечают важность расчёта пожарного цикла при анализе тенденций изменения климата (Bergeron et al., 2002; Bridge, 2001; Masters, 1990), многолетней пожарной активности (Drobyshev et al., 2012; Li, 2002), а также оценке эффективности организации противопожарных мероприятий (Bergeron et al., 2002; Kuuluvainen, 2009). В исследованиях зарубежных авторов можно встретить вычисление и анализ пожарных циклов на разных пространственных уровнях — от локального (Masters, 1990) и регионального (Bergeron et al.,

2002; Bridge, 2001; Mansuy et al., 2011) до национального (Drobyshev et al., 2012). Так, на территории канадской провинции Онтарио на нескольких пространственных уровнях были изучены изменения пожарных циклов с 1921 по 1995 г. (Bridge, 2001). Исследование показало корреляцию пожарных циклов с изменениями климатических трендов.

В исследовании (Drobyshev et al., 2012) пожарные циклы определялись в пределах округов Швеции для двух временных периодов: 1942–1975 и 1996–2008 гг. Проведённый авторами анализ выявил зависимость пожарных циклов от географического положения территории и тенденцию к сокращению пожарной активности в XX в. В работе (Li, 2002) пожарный цикл использован в количественных моделях динамики леса. Автор отмечает, что существует несколько подходов к расчёту пожарных циклов в зависимости от имеющихся данных о пожарах. Методика расчёта на основе площадных данных предполагает вычисление пожарного цикла как отношение общей и выгоревшей площади леса с поправкой на количество исследуемых лет. При наличии точечных данных, в частности данных дендрохронологии, пожарный цикл определяется через межпожарный интервал, рассчитываемый как отношение периода исследования (T) к количеству пожарных шрамов, обнаруженных на керне (n): $FC = T/(n-1)$.

В отечественной пирологии упоминания о существовании определённой цикличности в возникновении лесных пожаров можно встретить в работах (Фуряев и др., 1996; Харук и др., 2005). Одним из важнейших показателей при характеристике пожароопасности территории и анализе повреждений от пожаров является удельная горимость, рассчитываемая как выраженное в процентах отношение площади лесов, пройденных лесными пожарами за сезон, к общей площади охраняемого объекта (Мокеев, 1965). Данный показатель определялся для анализа динамики фактической горимости лесничеств Алтайского края с 1950 по 2008 г. (Шубин, 2009), а также для лесопожарного районирования юга Тюменской обл. (Ольховка и др., 2007). Кроме того, горимость территории определяется также по данным дендрохронологии в зависимости от величины среднего межпожарного интервала (Панюшкина, Арбатская, 1999).

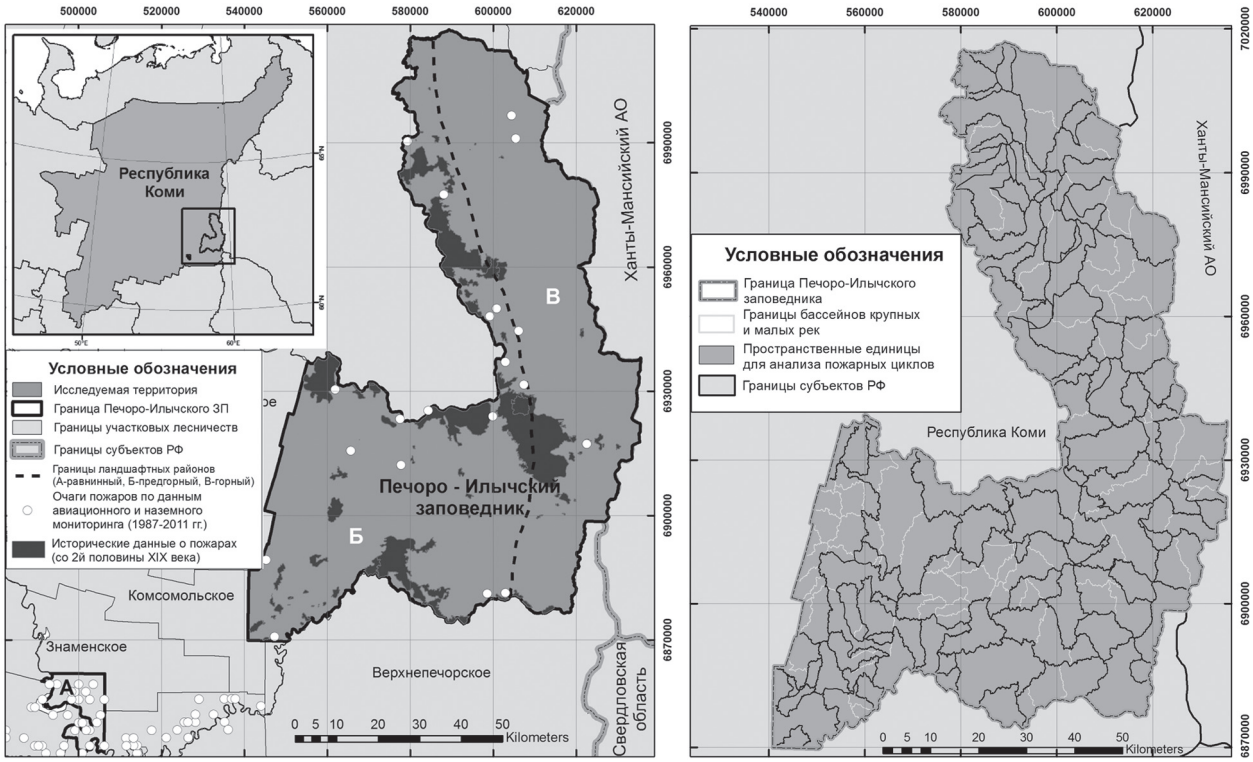
Среди отечественных исследований следует отметить работу сотрудников российского отделения международной независимой неправительственной экологической организации «Гринпис» (*англ*. Greenpeace) «Периоды повторяемости пожаров в северных лесах мира» (Журавлева, Ярошенко, 2014). Несмотря на разницу в терминологии, методика определения и смысл понятия «период повторяемости пожаров» совпадает с описанием пожарного цикла. Вычисление периода повторяемости пожаров выполняется аналогично методу оценки с использованием площадных данных в исследовании (Li, 2002), упомянутом выше. Расчёты основаны на сведениях о температурных аномалиях из системы мониторинга пожаров FIRMS за период с 2001 по 2013 г., а также на данных карты растительности, отражающей сомкнутость лесного полога, созданной специалистами Мэрилендского университета, США (*англ*. University of Maryland).

Приведённый выше анализ исследований показал важность определения пожарных циклов как на региональном, так и на локальном уровнях. Изменение пожарного цикла может привести к возникновению риска потери ключевых компонентов лесной экосистемы. Помимо этого, для лесов высоких широт, как отмечают А. З. Швиденко и Д. Г. Щепащенко (2013), низовые пожары в рамках исторически сложившихся пожарных циклов являются частью природного механизма, предотвращающего снижение продуктивности лесов. Целью настоящего исследования является картографирование пожарных циклов на локальном уровне посредством ГИС-анализа (ГИС — геоинформационные системы) пространственных данных о современной горимости территории и её пожарной истории.

Объект и исходные данные

Объектом исследования пожарных циклов на локальном уровне был выбран Печоро-Илычский заповедник, что обусловлено наличием информации об истории лесных пожаров на его территории (Алейников и др., 2015). Печоро-Илычский заповедник состоит из двух участков: Уральского (основного), занимающего восточную часть междуречья Печоры

и Илыча в предгорном и горном ландшафтных районах, и Якшинского, расположенного на юго-западе междуречья в равнинном ландшафтном районе (*рис. 1а*). Поскольку в рамках исследования (Алейников и др., 2015) была воссоздана история пожаров на территории Уральского участка заповедника, территориальный охват настоящего исследования ограничен указанным участком.



а *б*

Рис. 1. Район исследования (*а*). Границы пространственных единиц картографирования пожарных циклов (*б*)

Печоро-Илычский заповедник отличает высокое разнообразие природных ландшафтов (Харитонова и др., 2019). В геоморфологическом и ландшафтном плане Уральский участок заповедника разделяют на два района с запада на восток: предгорный и горный. История пожаров заповедника охватывает период времени начиная со второй половины XIX в. до 2014 г. Точные годы возникновения пожаров определены только для 20 из 89 выявленных гарей. Для остальных гарей определён период, когда они образовались: 1850–1899 гг., 1900–1929, 1930–1951, 1959–2014 гг. (см. *рис. 1а*). Ввиду этого картографирование пожарных циклов заповедника было проведено по четырём временным периодам: 1850–1899 гг., 1900–1951, 1952–1999, 2000–2014 гг. Современная горимость территории заповедника оценивалась по данным об очагах пожаров, детектированных авиационными и наземными способами мониторинга за период с 1987 по 2011 г. (Лупян и др., 2013) (см. *рис. 1а*). По каждому пожару данные содержат дату обнаружения и ликвидации, выгоревшую общую и лесную площадь, тип (верховой, низовой), причину возникновения.

На территорию заповедника была создана тематическая карта наземных экосистем по спутниковым данным Landsat (ETM+ и OLI) по состоянию на 2016 г. (Гаврилюк и др., 2018). Общая точность тематической классификации, оценённая на основе 400 контрольных точек, составила 90,8 % (каппа 0,89), что можно интерпретировать как высокую степень соответствия полученной карты контрольным данным. В легенде представлены следующие классы: темнохвойные, светлохвойные, лиственные, смешанные хвойные, смешанные хвойно-лиственные леса, болота и топи и др.

Методика исследования

Основные этапы картографирования пожарных циклов локального уровня включают: выделение границ пространственных единиц, под которыми понимается наибольшая площадь с относительно однородным характером повреждений; вычисление общей и пройденной огнём за исследуемый временной период площади леса в выделенных границах; определение пожарных циклов.

Пожарный цикл вычисляется по формуле (1) (Bergeron et al., 2002; Bridge, 2001; Drobyshev et al., 2012; Li, 2002), в которой приняты обозначения: FC — пожарный цикл, годы; T — количество исследуемых лет; A — площадь леса исследуемой территории; B — площадь леса, пройденная пожарами:

$$FC = T\left(A/B\right). \tag{1}$$

Картографирование пожарных циклов Печоро-Илычского заповедника выполнялось в пределах пространственных единиц, выделенных на основе границ речных бассейнов с учётом типов наземных экосистем и многолетней статистики повреждений лесов от пожаров (Плотникова и др., 2017) (*рис. 1б*). Подробное описание метода выделения границ бассейнов рек на территории Печоро-Илычского заповедника приведено в работе (Плотникова, Харитонова, 2018).

Вычисление общей площади леса в границах пространственных единиц проводилось на основе описанной выше тематической карты наземных экосистем. Определение пройденной огнём лесной площади выполнялось по данным о пожарной истории и современной горимости территории заповедника в зависимости от исследуемого временного периода. Так, для периодов 1850–1899, 1900–1951 гг. использовались данные о пожарной истории заповедника. Для периодов 1952–1999, 2000–2014 гг. также привлекались данные об очагах пожаров, детектированных авиационными и наземными способами мониторинга. На завершающем этапе выполнялось определение пожарных циклов в соответствии с формулой (1).

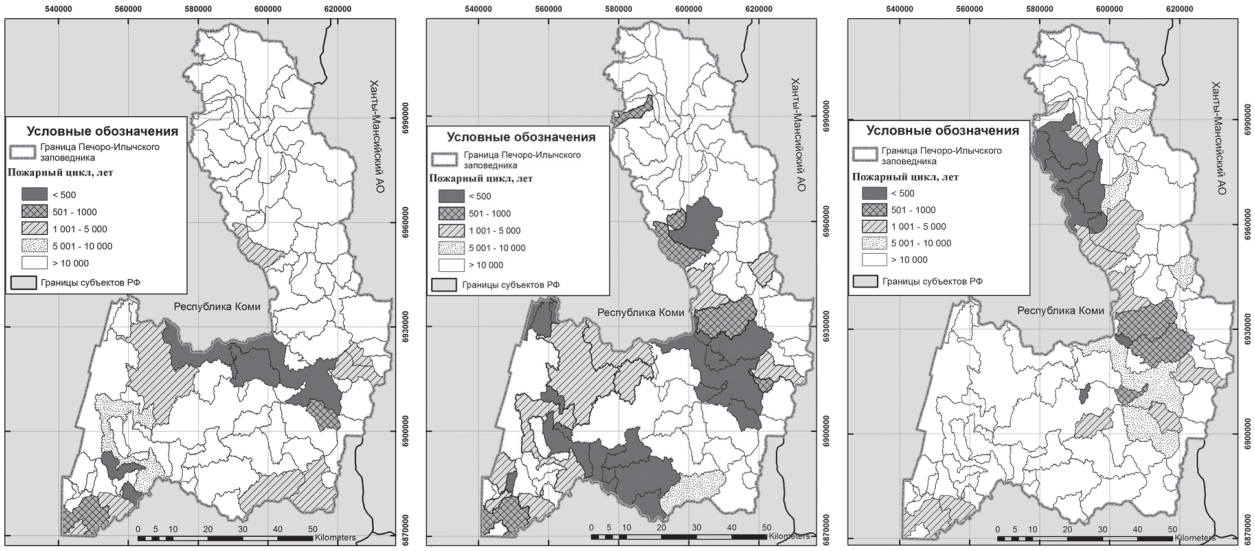
Результаты и обсуждение

В результате проведённого исследования созданы карты пожарных циклов на Уральскую часть Печоро-Илычского заповедника для четырёх временных периодов: 1850–1899 гг., 1900–1951, 1952–1999, 2000–2014 гг. (*рис. 2*, *3*, см. с. 127). Полученные карты позволяют выявить изменения в пожарных циклах за последние 150 лет.

Во второй половине XIX в. (1850–1899) воздействию огня были подвержены территории заповедника, расположенные в непосредственной близости к главным рекам. Здесь пожарные циклы составляли в основном менее 5000 лет (см. *рис. 2а*). Отметим, что наиболее существенное пирогенное воздействие характерно для участков заповедника, примыкающих к судоходной части р. Илыч, которая в исследуемый период являлась важной транспортной магистралью. Пожарный цикл таких территорий сильно сократился (менее 500 лет), что свидетельствует о значительном влиянии на них антропогенной деятельности.

В первой половине XX в. (1900–1951) изменения пожарных циклов наблюдаются в разных частях заповедника (см. *рис. 2б*). Сохраняется большое значение влияния человека на их длительность — природоохранный режим Печоро-Илычский заповедник получил лишь в 1930 г. Отмечается сокращение пожарных циклов для ряда пространственных единиц на юге заповедника до 500 лет, в то же время часть территории прекращает гореть и циклы превышают 10 000-летний период. При этом пожары появляются в северной части предгорного района, что приводит к сокращению пожарных циклов с 10 000 до 5000 лет и менее. Попрежнему в горной части заповедника пожары происходят крайне редко, поэтому для этой территории сохраняется длинный пожарный цикл (более 10 000 лет), что в некоторой степени обусловлено труднодоступностью данного участка заповедника. Кроме того, согласно

исследованию (Алейников и др., 2017), распространение пожаров на территории Печоро-Илычского заповедника имеет некоторую связь с ландшафтно-топографическими факторами (абсолютная высота, тип местоположения).



а *б* *в*

Рис. 2. Карты пожарных циклов Печоро-Илычского заповедника в периоды: *а* —1850–1899 гг.; *б* —1900 –1951 гг.; *в* —1952 –1999 гг.

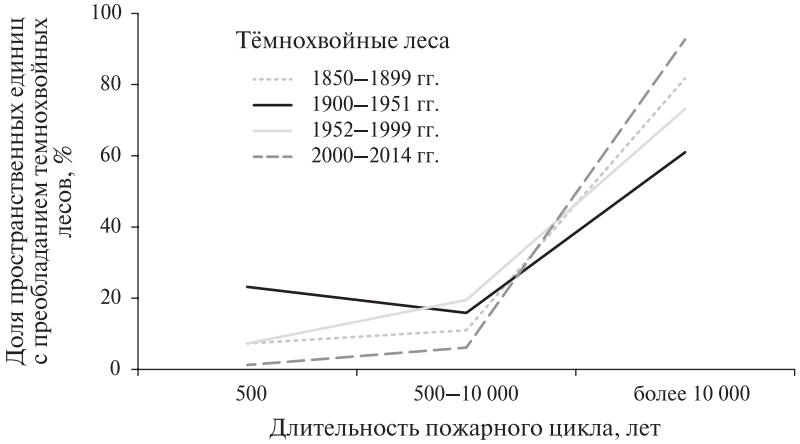


Рис. 3. Длительность пожарных циклов темнохвойных лесов исследуемой территории

Со второй половины XX в. (1952–1999), когда леса стали содержаться в природоохранном режиме, южная часть заповедника практически перестаёт гореть и пожарные циклы превышают 10 000 лет (см. *рис. 2в*). Но при этом пожарная активность наблюдается в северной части предгорного района, и, как следствие, происходит сокращение пожарных циклов до 500 лет. В границах пространственных единиц, примыкающих к пойме р. Илыч, для которых в предыдущие периоды был характерен короткий пожарный цикл, происходит его существенное удлинение. Можно выдвинуть предположение о значительном снижении пирогенного фактора в развитии лесных экосистем на этой территории.

Обращает на себя внимание то, что во всех проанализированных выше периодах для пространственных единиц, расположенных вблизи юго-западной границы заповедника, характерен более короткий пожарный цикл (менее 5000 лет). Выявленную особенность можно объяснить преобладанием сосновых лесов на этой территории. Как известно, в ходе эволюции

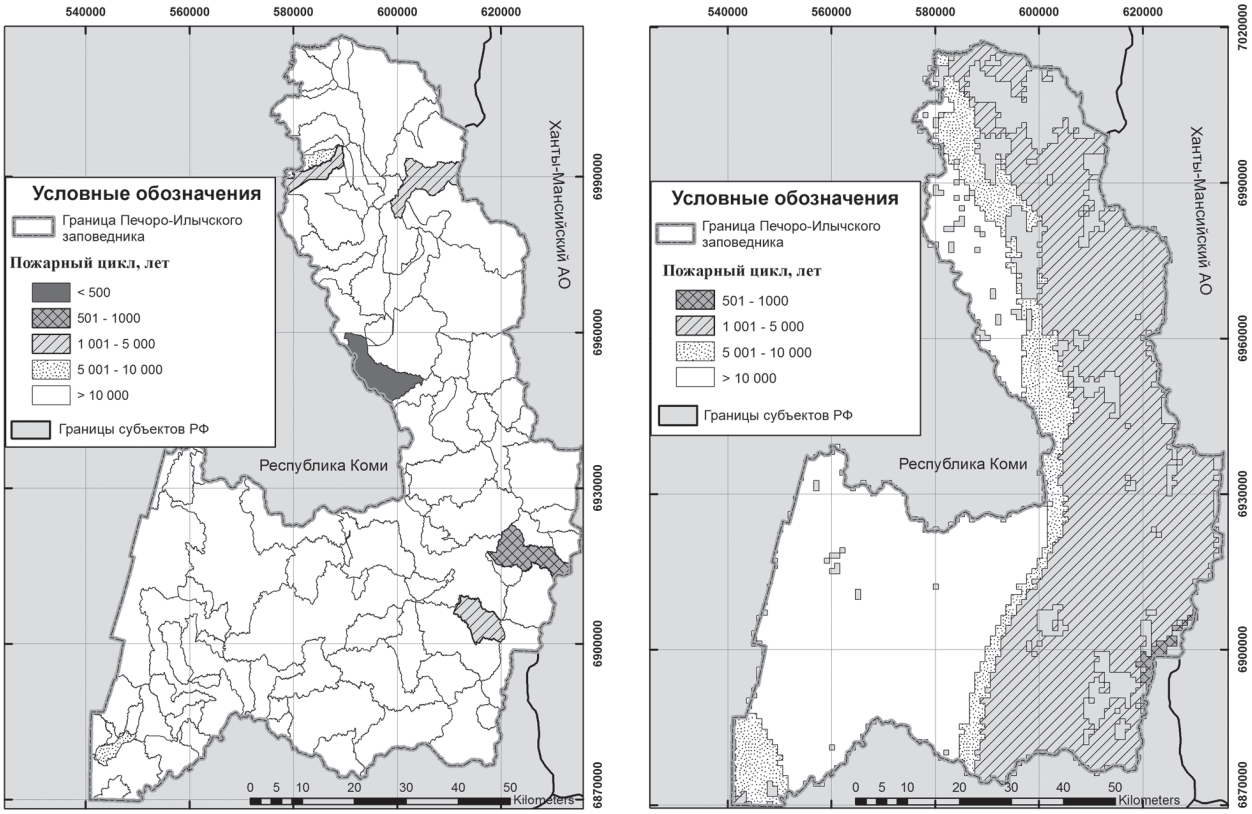
экология, популяционный и жизненный циклы сосны оказались тесно связаны с лесными пожарами, периодичность возникновения которых варьируется в интервале от 40 до 400 лет (Ильчуков, Торлопова, 2004). Таким образом, доминант древесного полога также является одним из факторов распространения пожаров в заповеднике.

В пределах заповедника выделено 102 пространственные единицы, в 82 из которых преобладают темнохвойные леса. Доминирование светлохвойных лесов отмечается на территории четырёх пространственных единиц, лиственных — на семи, смешанных хвойно-лиственных — на пяти. Для пространственных единиц с преобладанием тёмнохвойных лесов характерен более длительный пожарный цикл (более 10 000 лет) (см. *рис. 3*).

Для светлохвойных лесов не представляется возможным выделить характерную длительность пожарного цикла по причине недостаточного количества пространственных единиц с преобладанием данной породы (всего четыре единицы). Так, для двух единиц с преобладанием светлохвойных лесов во всех исследуемых временных периодах длительность пожарного цикла оценивалась от 500 до 10 000 лет, для остальных двух единиц, также расположенных в южной части заповедника, пожарный цикл составил более 10 000 лет.

Как следует из исследования (Ершов и др., 2017), преобладание в древостое более ранних сукцессионных видов, в частности лиственных пород, свидетельствует о прошлых нарушениях, основным фактором которых является лесной пожар. Анализ длительности пожарных циклов лиственных лесов для трёх временных периодов не выполним ввиду наличия данных только о современных наземных экосистемах Печоро-Илычского заповедника.

В начале XXI в. (2000–2014) Уральская часть заповедника не испытывала значительной пожарной нагрузки, что характеризует его статус и высокий уровень противопожарной охраны территории. На большей части пространственных единиц пожарные циклы составляют более 10 000 лет (*рис. 4а*).



а *б*

Рис. 4. Результаты картографирования пожарных циклов Печоро-Илычского заповедника в современный временной период: *а* — настоящего исследования; *б* — исследования российского отделения Greenpeace (Журавлева, Ярошенко, 2014)

По данным об очагах пожаров, обнаруженных авиационными и наземными способами мониторинга, в этот период было только два крупных пожара площадью более 1000 га. Оба произошли в 2000 г. на территории одной пространственной единицы, расположенной в северо-западной части заповедника. Поэтому выполненные расчёты пожарного цикла показали его длительность менее 500 лет. Сокращение пожарных циклов на территории отдельных пространственных единиц вызвано произошедшими пожарами площадью менее 1000 га.

На *рис. 4б* представлены результаты исследования российского отделения Greenpeace по картографированию пожарных циклов на территории заповедника. Получено растровое изображение с пространственным разрешением 1 км. Как отмечают авторы, использованный алгоритм подразумевает расчёт пожарных циклов по геометрически правильным кругам площадью 1 млн га без учёта ландшафтных границ. Таким образом, полученные результаты представляют собой интегральную оценку пожарных циклов для больших площадей, включающих различные типы леса и лесные ландшафты с разной исторически сложившейся частотой пожаров. Наиболее длинный (более 10 000 лет) пожарный цикл наблюдается в пределах предгорного района заповедника. На большей части горного района пожарный цикл находится в пределах 1001–5000 лет.

На *рис. 4а* видно, что в горном районе заповедника лишь одна пространственная единица характеризуется коротким пожарным циклом (501–1000 лет). На карте *рис. 4б* такого локального изменения пожарного цикла не наблюдается ввиду особенностей используемых в исследовании Greenpeace исходных данных системы FIRMS. В системе пожары детектируются по спутниковым данным спектрорадиометра MODIS, поэтому возгорания малой площади могут быть пропущены, что, в свою очередь, приводит к недооценке пройденной огнём площади и переоценке пожарных циклов. В то же время, согласно данным об очагах пожаров, обнаруженных авиационными и наземными способами мониторинга, на территории указанной пространственной единицы в 2010 г. произошёл лесной пожар, поэтому пожарный цикл сократился.

Заключение

Проведённое исследование позволило получить и проанализировать карты пожарных циклов основного участка Печоро-Илычского заповедника. Карты созданы для четырёх временных периодов: 1850–1899 гг., 1900–1951, 1952–1999, 2000–2014 гг. Анализ карт показал, что длительность пожарных циклов определяется не только преобладающим типом леса, но и доступностью территории для населения, в том числе близостью к судоходным рекам, наличием заповедного статуса.

Апробирована методика создания карт пожарных циклов на локальном пространственном уровне. Созданные в соответствии с методикой карты могут использоваться в практике лесного хозяйства при долгосрочной оценке ресурсного потенциала лесов на локальном уровне. Для периода 2000–2014 гг. также проанализирована карта пожарных циклов, полученная в результате исследования российского отделения Greenpeace.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 17-05-00300), а также в рамках тематики научных исследований Центра по проблемам экологии и продуктивности лесов Российской академии наук (№ АААА-А18-118052400130-7 «Методические подходы к оценке структурной организации и функционирования лесных экосистем»). Использовалась инфраструктура Центра коллективного пользования «ИКИ-Мониторинг» (Лупян и др., 2015).

Литература

1. *Алейников А. А.*, *Тюрин А. В.*, *Симакин Л. В.*, *Ефименко А. С.*, *Лазников А. А.* История пожаров в темнохвойных лесах Печоро-Илычского заповедника со второй половины XIX века по настоящее время // Сибирский лесной журн. 2015. № 6. С. 31–42. DOI: 10.15372/SJFS20150603.
2. *Алейников А. А.*, *Лисицына О. В.*, *Владимирова Н. А.*, *Крылов А. М.*, *Симакин Л. В.* Влияние доступности территории и характеристик рельефа на расположение и размер гарей в темнохвойных лесах Печоро-Илычского заповедника // Лесотехнич. журн. 2017. № 3(27). С. 49–58. DOI: 10.12737/article_59c227c2d0b820.11924404.
3. *Валендик Э. Н.*, *Иванова Г. А.* Пожарные режимы в лесах Сибири и Дальнего Востока // Лесоведение. 2001. № 4. С. 69–76.
4. *Гаврилюк Е. А.*, *Плотникова А. С.*, *Плотников Д. Е.* Картографирование наземных экосистем Печоро-Илычского заповедника и его окрестностей на основе восстановленных мультивременных спутниковых данных Landsat // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2018. Т. 15. № 5. С. 141–153. DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-5-141-153.
5. *Ершов Д. В.*, *Бурцева В. С.*, *Гаврилюк Е. А.*, *Королева Н. В.*, *Алейников А. А.* Диагностика современного сукцессионного состояния лесных экосистем Печоро-Илычского заповедника по спутниковым тематическим продуктам // Лесоведение. 2017. № 5. С. 3–15.
6. *Журавлева И. В.*, *Ярошенко А. Ю.* Периоды повторяемости пожаров в северных лесах мира: карта. М.: Гринпис России, 2014. URL: http://www.forestforum.ru/info/fires/fri_rus.pdf.
7. *Ильчуков С. В.*, *Торлопова Н. В.* Жизненное состояние сосняков, формирующихся на гарях, сплошных вырубках и подсеках // Вестн. ин-та биологии Коми науч. центра Уральского отд-ния РАН. 2004. № 4. С. 19–21.
8. *Лупян Е. А.*, *Ершов Д. В.*, *Барталев С. А.*, *Исаев А. С.* Информационная система дистанционного мониторинга лесных пожаров и их последствий: результаты последнего десятилетия и перспективы // Аэрокосмические методы и геоинформационные технологии в лесоведении и лесном хозяйстве: докл. 5-й Всероссийской конф., посвященной памяти выдающихся ученых-лесоводов В. И. Сухих и Г. Н. Коровина. М.: ЦЭПЛ РАН, 2013. С. 40–43.
9. *Лупян Е. А.*, *Прошин А. А.*, *Бурцев М. А.*, *Балашов И. В.*, *Барталев С. А.*, *Ефремов В. Ю.*, *Кашницкий А. В.*, *Мазуров А. А.*, *Матвеев А. М.*, *Суднева О. А.*, *Сычугов И. Г.*, *Толпин В. А.*, *Уваров И. А.* Центр коллективного пользования системами архивации, обработки и анализа спутниковых данных ИКИ РАН для решения задач изучения и мониторинга окружающей среды // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2015. Т. 12. № 5. С. 263–284.
10. *Мокеев Г. А.* Влияние природных и экономических условий на горимость лесов и охрану их от пожаров // Современные вопросы охраны лесов от пожаров и борьба с ними. М.: Лесная промышленность, 1965. С. 26–37.
11. *Ольховка И. Э.*, *Абрамов В. П.*, *Залесов С. В.* Анализ горимости лесов и лесопожарное районирование юга Тюменской области // Лесной вестн. 2007. № 8. С. 46–50.
12. *Панюшкина И. П.*, *Арбатская М. К.* Дендрохронологический подход в исследовании горимости лесов Эвенкии // Сибирский экологический журн. 1999. Т. 2. С. 167–173.
13. *Плотникова А. С.*, *Харитонова А. О.* Выделение границ водосборных бассейнов рек на локальном пространственном уровне // Вопросы лесной науки. 2018. № 1. URL: http://jfsi.ru/1-1-2018-plotnikova_kharitonova/. DOI: 10.31509/2658-607x-2018-1-1-1-10.
14. *Плотникова А. С.*, *Ершов Д. В.*, *Харитонова А. О.* Использование ГИС-технологий при картографировании пожарных режимов лесных экосистем Печоро-Илычского заповедника // Геодезия, картография, геоинформатика и кадастры. От идеи до внедрения: сб. материалов 2-й Международной научно-практ. конф. Санкт-Петербург. 8–10 нояб. 2017 / науч. ред. О. А. Лазебник. СПб.: Политехника, 2017. С. 464–470.
15. *Фуряев В. В.*, *Курбатский Н. П.*, *Бузыкин А. И.* Роль пожаров в процессе лесообразования. Новосибирск: Наука, 1996. 252 с.
16. *Харитонова А. О.*, *Плотникова А. С.*, *Ершов Д. В.* Современные и исторические пожарные режимы Печоро-Илычского заповедника и его окрестностей // Вопросы лесной науки. Аэрокосм. методы и ГИС-технологии в лесоведении, лесном хоз-ве и экологии. 2019. Т. 2. № 3. URL: http://jfsi.ru/2-3-2019-kharitonova_et_all/. DOI: 10.31509/2658-607x-2019-2-3-1-17.
17. *Харук В. И.*, *Двинская М. Л.*, *Рэнсон К. Д.* Пространственно-временная динамика пожаров в лиственничных лесах северной тайги Средней Сибири // Экология. 2005. № 5. С. 334–343.
18. *Швиденко А. З.*, *Щепащенко Д. Г.* Климатические изменения и лесные пожары в России // Лесоведение. 2013. № 5. С. 50–61.
19. *Шешуков М. А.*, *Брусова Е. В.*, *Позднякова В. В.* Современные пожарные режимы в лесах Дальнего Востока // Лесоведение. 2008. № 4. С. 3–9.

20. *Шубин Д. А.* Фактическая горимость лесов лесничеств Приобского водоохранного сосново-березового лесохозяйственного района Алтайского края // Актуальные проблемы лесного комплекса. 2009. № 22. С. 57–63
21. *Agee J. K.* Fire ecology of Pacific Northwest forests. Washington, D. C.: Island Press, 1993. 493 p.
22. *Bergeron Y.*, *Leduc A.*, *Harvey B.*, *Gauthier S.* Natural fire regime: a guide for sustainable management of the Canadian boreal forest // Silva Fennica. 2002. V. 36. No. 1. P. 81–95.
23. *Bridge S. R. J.* Spatial and temporal variations in the fire cycle across Ontario. Ontario Ministry of Natural Resources. Northeast Science and Technology. South Porcupine, Ontario, 2001. NEST TR-043. 41 p.
24. *Drobyshev I.*, *Niklasson M.*, *Linderholm H. W.* Forest fire activity in Sweden: climatic controls and geographical patterns in 20th century // Agricultural and Forest Meteorology. 2012. V. 154. P. 174–186. DOI: 10.1016/j.agrformet.2011.11.002.
25. *Frech R. J.*, *Caputo J. A.*, *McCulloch K.* Forest fire cycle analysis for applications in forest management planning. Ontario Ministry of Natural Resources. AFFM Publication No. 362. 1999.
26. *Kuuluvainen T.* Forest management and biodiversity conservation based on natural ecosystem dynamics in northern Europe: the complexity challenge // AMBIO: J. Human Environment. 2009. V. 38. No. 6. P. 309–316. DOI: 10.1579/08-a-490.1.
27. *Li C.* Estimation of fire frequency and fire cycle: a computational perspective // Ecological Modelling. 2002. V. 154. No. 1-2. P. 103–120.
28. *Mansuy N.*, *Gauthier S.*, *Robitaille A.*, *Bergeron Y.* The effects of surficial deposit – drainage combinations on spatial variations of fire cycles in the boreal forest of eastern Canada // Intern. J. Wildland Fire. 2011. V. 19. No. 8. P. 1083–1098. DOI: 10.1071/WF09144.
29. *Masters A. M.* Changes in forest fire frequency in Kootenay National Park, Canadian Rockies // Canadian J. Botany. 1990. V. 68. No. 8. P. 1763–1767. DOI: 10.1139/b90-227.
30. *Wagner C. E.* Age-class distribution and the forest fire cycle // Canadian J. Forest Research. 1978. V. 8. No. 2. P. 220–227. DOI: 10.1139/x78-034.

Mapping of fire cycles in the Pechora-Ilych Nature Reserve

A. S. Plotnikova, A. O. Kharitonova

Center for Forest Ecology and Productivity RAS, Moscow 117997, Russia
E-mail: Alexandra@ifi.rssi.ru

The fire regime of forest ecosystems determines the conditions for fire occurrence, distribution, and its long-term consequences. The fire cycle is one of the properties of fire regime, which is defined as the amount of time required to completely burn the forest area under study. Definition of fire cycle is important for climate change and long-term fire activity trends analysis as well as for evaluating the efficiency of fire fighting measures. The goal of this study was to map the fire cycles of the Pechora-Ilych Nature Reserve. We used the following input data: the Reserve fires history from the second half of the 19th century to 2014; fires anchor points detected by aviation and ground-based means of monitoring from 1987 to 2011; thematic map of terrestrial ecosystems created using Landsat satellite data (ETM+ and OLI) as of 2016. We highlight the main stages of mapping of fire cycles at the local level: definition of the boundaries of spatial units, calculation of both the total forest area and touched-by-fire area within the studied timespan within defined boundaries, and definition of fire cycles. We developed fire cycle maps for the main part of the Pechora-Ilych Nature Reserve for four time periods: 1850–1899, 1900–1951, 1952–1999, and 2000–2014. Regarding the period 2000–2014, we additionally analyzed the fire cycle map prepared by Greenpeace Russia. The results of present study allow tracking the identifying changes in fire cycles over the past 150 years. The maps analysis shows that the length of fire cycles is determined not only by forest type, but also by infrastructural accessibility of the area, including proximity to navigable rivers and the availability of the reserve status.

Keywords: fire cycle, forest fires, Pechora-Ilych Nature Reserve, forest ecosystems

Accepted: 06.03.2020
DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-2-123-133

References

1. Aleinikov A. A., Tyurin A. V., Simakin L. V., Efimenko A. S., Laznikov A. A., Istoriya pozharov v temnokhvoinykh lesakh Pechoro-Ilychskogo zapovednika so vtoroi poloviny XIX veka po nastoyashchee vremya (Fire history of dark needle coniferous forests in Pechora-Ilych Nature Reserve from the second half of XIX century to present time), *Sibirskii lesnoi zhurnal*, 2015, No. 6, pp. 31–42, DOI: 10.15372/SJFS20150603.
2. Aleinikov A. A., Lisitsyna O. V., Vladimirova N. A., Krylov A. M., Simakin L. V., Vliyanie dostupnosti territorii i kharakteristik rel'efa na raspolozhenie i razmer garei v temnokhvoinykh lesakh Pechoro-Ilychskogo zapovednika (The influence of the accessibility of the territory and the relief on the location and size of burns in the dark coniferous forests in the Pechora-Ilych Nature Reserve), *Lesotekhnicheskii zhurnal*, 2017, No. 3(27), pp. 49–58, DOI: 10.12737/article_59c227c2d0b820.11924404.
3. Valendik E. N., Ivanova G. A., Pozharnye rezhimy v lesakh Sibiri i Dal'nego Vostoka (Fire regimes in the forests of Siberia and the Far East), *Lesovedenie*, 2001, No. 4, pp. 69–76.
4. Gavrilyuk E. A., Plotnikova A. S., Plotnikov D. E., Kartografirovanie nazemnykh ekosistem Pechoro-Ilychskogo zapovednika i ego okrestnostei na osnove vosstanovlennykh mul'tivremennykh sputnikovykh dannykh Landsat (Land cover mapping of the Pechora-Ilych Nature Reserve and its vicinity based on reconstructed multitemporal Landsat satellite data), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2018, Vol. 15, No. 5, pp. 141–153, DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-5-141-153.
5. Ershov D. V., Burtseva V. S., Gavrilyuk E. A., Koroleva N. V., Aleinikov A. A., Diagnostika sovremennogo suktsessionnogo sostoyaniya lesnykh ekosistem Pechoro-Ilychskogo zapovednika po sputnikovym tematicheskim produktam (Diagnosis of the current succession state of Pechora-Ilych Nature Reserve forest ecosystems by satellite thematic products), *Lesovedenie*, 2017, No. 5, pp. 3–15.
6. Zhuravleva I. V., Yaroshenko A. Yu., *Periody povtoryaemosti pozharov v severnykh lesakh mira: karta* (Fire return intervals in the northern forests of the world: map), Moscow: Greenpeace Russia, 2014, available at: http://www.forestforum.ru/info/fires/fri_rus.pdf.
7. Il'chukov S. V., Torlopova N. V., Zhiznennoe sostoyanie sosnyakov, formiruyushchikhsya na garyakh, sploshnykh vyrubkakh i podsekakh (The vital state of the pine forest, emerging on the natural and artificial burned areas, and clear cuttings), *Vestnik instituta biologii Komi nauchnogo tsentra Ural'skogo otdeleniya RAN*, 2004, No. 4, pp. 19–21.
8. Loupian E. A., Ershov D. V., Bartalev S. A., Isaev A. S., Informatsionnaya sistema distantsionnogo monitoringa lesnykh pozharov i ikh posledstvii: rezul'taty poslednego desyatiletiya i perspektivy (Information System for Remote Monitoring of Forest Fires and Their Consequences: the Results of the Last Decade and Prospects), *Ae'rokosmicheskie metody i geoinformatsionnye tekhnologii v lesovedenii i lesnom khozyaistve* (Remote Sensing and Gis-Technologies in Forestry and Forest Management), Proc. 5th All-Russia Science Conf., Moscow, 22–24 Apr. 2013, Moscow, 2013, pp. 40–43.
9. Loupian E. A., Proshin A. A., Burtsev M. A., Balashov I. V., Bartalev S. A., Efremov V. Yu., Kashnitskii A. V., Mazurov A. A., Matveev A. M., Sudneva O. A., Sychugov I. G., Tolpin V. A., Uvarov I. A., Tsentr kollektivnogo pol'zovaniya sistemami arkhivatsii, obrabotki i analiza sputnikovykh dannykh IKI RAN dlya resheniya zadach izucheniya i monitoringa okruzhayushchei sredy (IKI center for collective use of satellite data archiving, processing and analysis systems aimed at solving the problems of environmental study and monitoring), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2015, Vol. 12, No. 5, pp. 263–284.
10. Mokeev G. A., Vliyanie prirodnykh i ekonomicheskikh uslovii na gorimost' lesov i okhranu ikh ot pozharov (The influence of natural and economic conditions on the burning of forests and their protection from fires), *Sovremennye voprosy okhrany lesov ot pozharov i bor'ba s nimi*, Moscow: Lesnaya promyshlennost', 1965, pp. 26–37.
11. Ol'khovka I. E., Abramov V. P., Zalesov S. V., Analiz gorimosti lesov i lesopozharnoe raionirovanie yuga Tyumenskoi oblasti (Analysis of forest burnability and forest fire zoning of the south of the Tyumen region), *Lesnoi vestnik*, 2007, No. 8, pp. 46–50.
12. Panyushkina I. P., Arbatskaya M. K., Dendrokhronologicheskii podkhod v issledovanii gorimosti lesov Evenkii (Dendrochronological approach to study of flammability of forests in Evenkia (Siberia)), *Sibirskii ekologicheskii zhurnal*, 1999, Vol. 2, pp. 167–173.
13. Plotnikova A. S., Kharitonova A. O., Vydelenie granits vodosbornykh basseinov rek na lokal'nom prostranstvennom urovne (The identification of drainage basins borders at local spatial scale), *Voprosy lesnoi nauki*, 2018, No. 1, available at: http://jfsi.ru/1-1-2018-plotnikova_kharitonova/, DOI: 10.31509/2658-607x-2018-1-1-1-10.
14. Plotnikova A. S., Ershov D. V., Kharitonova A. O., Ispol'zovanie GIS-tekhnologii pri kartografirovanii pozharnykh rezhimov lesnykh ekosistem Pechoro-Ilychskogo zapovednika (The use of GIS technologies for mapping fire regimes of forest ecosystems of the Pechoro-Ilychsky reserve), *Geodeziya*, *kartografiya*,

geoinformatika i kadastry. Ot idei do vnedreniya (Geodesy, Cartography, Geoinformatics and Cadastre. From Idea to Application), Proc. 2nd Intern. Conf. Applied Science, Russia, Saint Petersburg, 8–10 Nov., 2017, O. A. Lazebnik (ed.), Saint Petersburg: Politekhnika, 2017, pp. 464–470.

15. Furyaev V. V., Kurbatskii N. P., Buzykin A. I., *Rol' pozharov v protsesse lesoobrazovaniya* (The role of fires in the forestation process), Novosibirsk: Nauka, 1996, 252 p.
16. Kharitonova A. O., Plotnikova A. S., Ershov D. V., Sovremennye i istoricheskie pozharnye rezhimy Pechoro-Ilychskogo zapovednika i ego okrestnostei (Current and historical fire regimes of Pechora-Ilych nature reserve and its surroundings), *Voprosy lesnoi nauki. Aerokosmicheskie metody i GIS-tekhnologii v lesovedenii*, *lesnom khozyaistve i ekologii*, 2019, Vol. 2, No. 3, available at: http://jfsi.ru/2-3-2019-kharitonova_et_all/, DOI: 10.31509/2658-607x-2019-2-3-1-17.
17. Kharuk V. I., Dvinskaya M. L., Renson K. D., Prostranstvenno-vremennaya dinamika pozharov v listvennichnykh lesakh severnoi taigi Srednei Sibiri (Spatial-temporal dynamics of fires in larch forests of the northern taiga of Central Siberia), *Ekologiya*, 2005, No. 5, pp. 334–343.
18. Shvidenko A. Z., Shchepashchenko D. G., Klimaticheskie izmeneniya i lesnye pozhary v Rossii (Climate changes and wildfires in Russia), *Lesovedenie*, 2013, No. 5, pp. 50–61.
19. Sheshukov M. A., Brusova E. V., Pozdnyakova V. V., Sovremennye pozharnye rezhimy v lesakh Dal'nego Vostoka (The present fire regimes in forests of the Far East), *Lesovedenie*, 2008, No. 4, pp. 3–9.
20. Shubin D. A., Fakticheskaya gorimost' lesov lesnichestv Priobskogo vodookhrannogo sosnovo-berezovogo lesokhozyaistvennogo raiona Altaiskogo kraya (Actual burning rate of forest districts of Priobsky water conservation pine-birch forestry area of Altai region), *Aktual'nye problemy lesnogo kompleksa*, 2009, No. 22, pp. 57–63.
21. Agee J. K., *Fire ecology of Pacific Northwest forests*, Washington, D. C.: Island Press, 493 p.
22. Bergeron Y., Leduc A., Harvey B. D., Gauthier S., Natural fire regime: a guide for sustainable management of the Canadian boreal forest, *Silva Fennica*, 2002, Vol. 36, No. 1, pp. 81–95.
23. Bridge S. R. J., *Spatial and temporal variations in the fire cycle across Ontario*, Ontario Ministry of Natural Resources, Northeast Science and Technology, South Porcupine, Ontario, 2001, NEST TR-043, 41 p.
24. Drobyshev I., Niklasson M., Linderholm H. W., Forest fire activity in Sweden: climatic controls and geographical patterns in 20th century, *Agricultural and Forest Meteorology*, 2012, Vol. 154, pp. 174–186, DOI: 10.1016/j.agrformet.2011.11.002.
25. Frech R. J., Caputo J. A., McCulloch K., *Forest fire cycle analysis for applications in forest management planning*, Ontario Ministry of Natural Resources, AFFM Publication No. 362, 1999.
26. Kuuluvainen T., Forest management and biodiversity conservation based on natural ecosystem dynamics in northern Europe: the complexity challenge, *AMBIO: J. Human Environment*, 2009, Vol. 38, No. 6, pp. 309–316, DOI: 10.1579/08-a-490.1.
27. Li C., Estimation of fire frequency and fire cycle: a computational perspective, *Ecological Modelling*, 2002, Vol. 154, No. 1-2, pp. 103–120.
28. Mansuy N., Gauthier S., Robitaille A., Bergeron Y., The effects of surficial deposit-drainage combinations on spatial variations of fire cycles in the boreal forest of eastern Canada, *Intern. J. Wildland Fire*, 2011, Vol. 19, No. 8, pp. 1083–1098, DOI: 10.1071/WF09144.
29. Masters A. M., Changes in forest fire frequency in Kootenay National Park, Canadian Rockies, *Canadian J. Botany*, 1990, Vol. 68, No. 8, pp. 1763–1767, DOI: 10.1139/b90-227.
30. Wagner C. E., Age-class distribution and the forest fire cycle, *Canadian J. Forest Research*, 1978, Vol. 8, No. 2, pp. 220–227, DOI: 10.1139/x78-034.