Пространственная оценка современных пожарных режимов лесных экосистем России

А. С. Плотникова[1], Д. В. Ершов[1], А. О. Харитонова[1], П. П. Шуляк[1], С. А. Барталев[2], Ф. В. Стыценко[2]

[1] *Центр по проблемам экологии и продуктивности лесов РАН Москва, 117997, Россия*

[2] *Институт космических исследований РАН, Москва, 117997, Россия*

E-mail: Alexandra@ifi.rssi.ru

Пожарный режим экосистемы определяет условия возникновения, распространения и долговременные последствия лесных пожаров. В статье приведены результаты оценки современных пожарных режимов лесов России с применением классификации LANDFIRE, содержащей пять классов в зависимости от периода повторяемости пожаров (менее 35, 36–200 и более 200 лет) и степени повреждения экосистем огнём (низкая, средняя и высокая). В исследовании использован следующий набор исходных данных: карта растительного покрова, созданная по данным спектрорадиометра MODIS с пространственным разрешением 250 м; архивные данные авиационной службы охраны лесов от пожаров об очагах возгораний с 1987 по 2011 г.; многолетние данные спутникового мониторинга природных пожаров, доступные пользователям ЦКП «ИКИ-Мониторинг» с 2000 г. по настоящее время; формирующиеся на основе методов дистанционного зондирования многолетние данные о степени повреждения лесов России по четырём категориям состояния (слабоповреждённые/ослабленные, сильно ослабленные, усыхающие и погибшие) с 2006 г. по настоящее время. Период исследования составляет 30 лет с 1987 по 2016 г. Пространственной единицей оценки современных пожарных режимов является связный участок леса одного типа, выделенный по карте растительного покрова. Согласно LANDFIRE метод оценки современных пожарных режимов на национальном уровне базируется на анализе для каждой пространственной единицы повторяемости пожаров в двух временных интервалах — эталонном и современном, а также степени повреждения огнём лесов. В настоящей работе эталонный интервал охватывает период с 1987 по 2016 г.; современный — с 2006 по 2016 г. В результате создана карта современных пожарных режимов лесных экосистем России, легенда которой, помимо пяти классов LANDFIRE, содержит класс «нет пожаров». На основе полученных результатов проведён анализ площадей современных пожарных режимов для совокупности всех типов лесных экосистем России, а также отдельно для хвойных, лиственных и смешанных лесов. Аналогичный анализ проведён для пространственных данных о современных пожарных режимах США, предоставляемых сайтом программы LANDFIRE. Исследование показало, что для картографирования пожарных режимов лесных экосистем России в соответствии с подходом LANDFIRE необходимо расширение эталонного интервала оценки периода повторяемости пожаров.

Ключевые слова: пожарные режимы, период повторяемости пожаров, степень повреждения лесов пожарами, лесные экосистемы

Одобрена к печати: 04.10.2019

DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-5-228-240

Введение

Природные пожары часто оказывают негативное воздействие на леса. В частности, многократное воздействие огня на лесные экосистемы сокращает их площадь, что, в свою очередь, влияет на климат и биосферу Земли, может приводить к смене гидрологического режима, потере почвенного плодородия, снижению биологической продуктивности, видового и ландшафтного разнообразия, изменениям условий обитания диких животных. Степень воздействия огня на экосистемы, в результате которого происходит полное или частичное многолетнее изменение состояния и видового состава растительности, определяет пожарный режим территории (Agee, 1993).

Вопросы определения и классификации пожарных режимов наземных экосистем исследованы рядом зарубежных авторов. Так, М. Л. Хейнсельман (Heinselman, 1973) выделяет шесть типов пожарных режимов отдельно для низовых и верховых пожаров на основе их частоты и интенсивности. Эта классификация была усовершенствована в работе (Kilgore, 1981) добавлением категории, характеризуемой доминированием низовых пожаров малой интенсивности и редкими пожарами высокой интенсивности со сменой типа растительности (*англ.* stand-replacement). Ещё один подход (Frost, 1998) предусматривает выделение 30 различных режимов на основе учёта периодичности пожарных интервалов, преобладающего сезона горения, частоты возникновения пожаров и их влияния на экосистему. Авторы статьи (Brown, Smith, 2000) выделяют три базовых пожарных режима: пожары подлеска (леса), пожары stand-replacement (любая растительность) и пожары смешанного типа повреждений лесов.

В классификации (Hardy et al., 1998) пожарные режимы определяются в соответствии с периодом повторяемости пожаров и степенью повреждения растительности. Классификация содержит пять режимов с пожарами и один без возгораний. П. Морган (P. Morgan) с соавторами (Morgan et al., 2001) предложили использовать понятия «нелетальные» и «летальные» (stand-replacement) пожары для лесных и кустарниковых экосистем. Авторы выделяют четыре класса пожарных режимов: нелетальные пожары в лесах; нелетальные пожары в кустарниках; летальные пожары в лесных и кустарниковых экосистемах; пожары смешанного повреждения лесов. К пятому классу пожарных режимов отнесены редкие возгорания, что соответствует классу без возгораний в классификации (Hardy et al., 1998).

Классификация LANDFIRE (Landscape Fire and Resource Management Planning Tools) используется в США в рамках одноимённой национальной программы по борьбе с природными пожарами (https://www.landfire.gov). Она предоставляет данные о растительности, горючих материалах и лесных пожарах для стратегического планирования управления природными ресурсами и борьбы с лесными пожарами. LANDFIRE является обновлённой классификацией (Hardy et al., 1998) и включает пять классов пожарных режимов, различающихся степенью повреждения (*англ.* severity) и периодом повторяемости пожаров (Barrett et al., 2010). Выделяются периоды повторяемости пожаров 0–35, 36–200 и более 200 лет, а также низкая, смешанная (средняя) и высокая степени повреждения экосистем огнём (*таблица*).

Схема классификации пожарных режимов LANDFIRE

Группа	Период повторяемости пожаров	Степень повреждения	Описание степени повреждения
I	0–35 лет	Низкая, средняя	В основном пожары с низкой степенью повреждения, приводящие к смене менее 25 % доминирующего типа растительности. Могут встречаться пожары со средней степенью повреждения, которые приводят к смене типа растительности до 75 %
II	0–35 лет	Смена породного состава	Пожары с высокой степенью повреждения, приводящие к смене более чем 75 % доминирующего типа растительности
III	36–200 лет	Низкая, средняя	Преимущественно пожары с низкой и средней степенью повреждения
IV	36–200 лет	Смена породного состава	Пожары с высокой степенью повреждения
V	Более 200 лет	Смена породного состава, любая степень повреждения	Преимущественно пожары, приводящие к смене доминирующего типа растительности. Однако могут встречаться пожары различной степени повреждения

Исследования отечественных учёных затрагивают различные факторы пожарной опасности, включая климат (Софронов, Волокитина, 1990), горючие материалы (Волокитина,

Софронов, 2002) и наличие источников огня (Иванов и др., 2004). Проведена оценка площадей, пройденных лесными пожарами на территории России в XXI в. с учётом типов леса и периодов пожароопасных сезонов (Лупян и др., 2017). Ряд публикаций содержит результаты пирологических исследований на региональном уровне, такие как классификация территории Сибири по фактической горимости (Рубцов и др., 2010; Пономарев и др., 2008), мониторинг нарушенности лесов Нижнего Приангарья (Сухинин и др., 2006), Таймыра (Зиганшин и др., 2005) и Алтае-Саянского экорегиона (Соколов и др., 2005).

Актуальность определения современных пожарных режимов лесов России обусловлена наблюдаемой тенденцией возрастания разрушительной силы пожаров (Барталев и др., 2015; Швиденко, Щепащенко, 2013). В частности, Швиденко А. З. и Щепащенко Д. Г. (2013) отмечают рост частоты катастрофических лесных пожаров. Первые результаты исследований пожарных режимов в Центре по проблемам экологии и продуктивности лесов Российской академии наук (ЦЭПЛ РАН) получены в 2016 г.: была изучена горимость в границах лесных районов России на предмет использования их в качестве пространственных единиц учёта пожарных режимов на национальном уровне (Плотникова и др., 2016). Целью настоящего исследования является изучение возможности применения классификации LANDFIRE для оценки современных пожарных режимов лесов России. В отличие от ранее выполненных исследований в качестве пространственной единицы рассматривается связный участок леса одного типа согласно карте растительного покрова. Такой подход позволяет учитывать локальные лесорастительные условия при изучении воздействия огня и потенциальной возможности трансформации лесных экосистем.

Исходные данные и методика исследования

В исследовании пожарных режимов лесных экосистем России был использован следующий набор исходных данных: карта растительного покрова; архивные данные авиационной службы охраны лесов от пожаров об очагах возгораний; многолетние данные спутникового мониторинга природных пожаров; многолетние данные о повреждениях огнём лесов России.

Карта растительного покрова России создана по данным спектрорадиометра MODIS/Terra с пространственным разрешением 250 м (Барталев и др., 2011, 2016). Легенда карты содержит 23 тематических класса, 18 из которых соответствуют различным типам растительного покрова. В частности, лесные экосистемы представлены классами насаждений с преобладанием темнохвойных, светлохвойных, лиственных и лиственничных пород деревьев, а также смешанными в различных соотношениях хвойно-лиственными лесами.

Оценка современных пожарных режимов стала возможной благодаря формированию на основе методов дистанционного зондирования многолетних и ежегодно обновляемых временных рядов данных о степени повреждения лесов России пожарами (Барталев и др., 2015). Спутниковая оценка основана на установленной взаимосвязи между значениями средневзвешенной категории состояния древостоев и величиной вегетационного индекса RdSWVI (Стыценко и др., 2013). Созданные базы геопространственных данных о степени повреждения лесов по четырём категориям состояния (слабоповреждённые/ослабленные, сильно ослабленные, усыхающие и погибшие) охватывают период с 2006 г. по настоящее время.

Архивные данные авиационной службы охраны лесов от пожаров представляют собой пространственную базу данных обнаруженных очагов горения с указанием площади. В рамках исследования использовались сведения с 1987 по 2011 г. (Лупян и др., 2013). Архив данных о пожарах, содержащий информацию о детектированных по спутниковым изображениям на всей территории России очагах горения, доступен пользователям Центра коллективного пользования «ИКИ-Мониторинг» с 2000 г. по настоящее время (Лупян и др., 2015).

Период настоящего исследования составляет 30 лет с 1987 по 2016 г. При этом информация о пожарах за интервал с 2000 по 2011 г. доступна из двух независимых источников, что во избежание двойного учёта крупных лесных пожаров для указанного временного интервала потребовало фильтрации данных об обнаруженных авиацией очагах. В зоне авиационной

и наземной охраны крупными считаются пожары, обнаруженные на площади более 25 га в европейской части России и более 200 га — в Сибири и на Дальнем Востоке (Коровин, Андреев, 1988). Анализ имеющихся данных показал, что более 87 % пожаров, обнаруженных авиацией в период с 2000 по 2011 г., имеют площадь менее 25 га. Для большей надёжности в исследовании использовались пожары, суммарная площадь которых на момент их ликвидации составила менее 1 га (43,7 % всех пожаров).

Метод пространственной оценки современных пожарных режимов лесных экосистем на национальном уровне

Метод базируется на анализе повторяемости пожаров на заданном временном интервале и степени повреждения огнём лесов для каждой пространственной единицы картографирования. Пространственная оценка пожарных режимов на территории России выполняется с привлечением классификации LANDFIRE (см. *таблицу*).

В соответствии с принятым в LANDFIRE подходом (*рис. 1*) выделяются эталонный (*англ.* reference condition period) и современный (*англ.* current period) временные интервалы (Barrett et al., 2010). Эталонный интервал определяется на основе различных источников данных о пожарах: наземных, авиационных и спутниковых наблюдениях, дендрохронологических исследованиях. Для определения степени воздействия огня на леса в прошлые годы анализируется возраст насаждения, вид и стадия восстановительной сукцессии древесной растительности (Morgan et al., 2001).

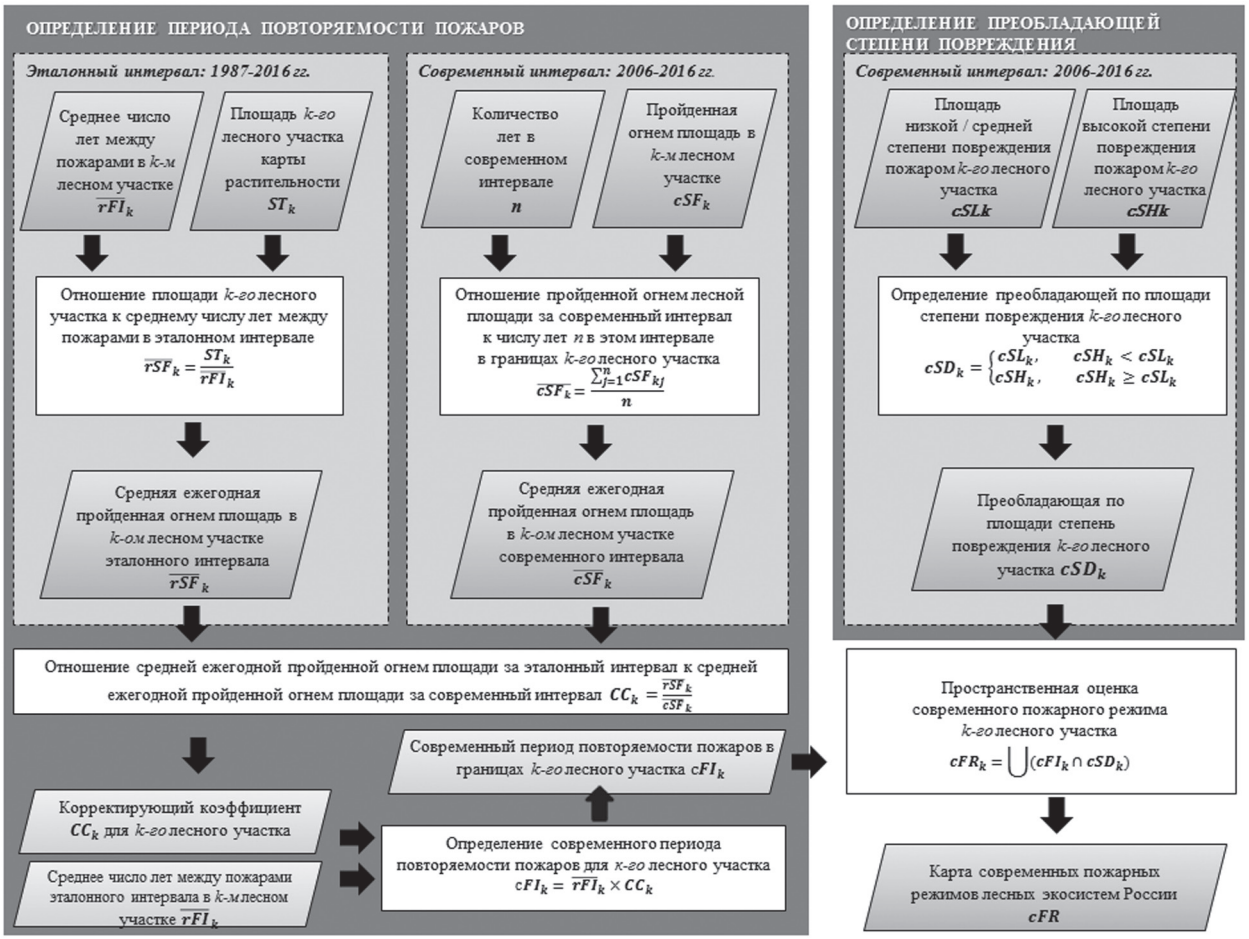

Рис. 1. Схема метода пространственной оценки современных пожарных режимов лесных экосистем России

В настоящем исследовании эталонный интервал рассчитывается по историческим данным наземных, авиационных и спутниковых наблюдений, охватывающим 30 лет с 1987 по 2016 г. Для оценки современного интервала выбран период с 2006 по 2016 г. Временные границы современного интервала объясняются наличием данных спутниковой оценки степени повреждения лесов пожарами с 2006 г.

Согласно методике LANDFIRE период повторяемости пожаров эталонного интервала (*англ.* reference mean fire interval, $\overline{rFI}_k$) определяется как среднее число лет между пожарами. Так, год с пожарами, зарегистрированными авиационными и спутниковыми средствами, условно будем называть пожарным годом. Для пространственных единиц, в которых за 30-летний эталонный интервал встречалось два и более пожарных года (или один и более межпожарных интервалов), рассчитывалось среднее число лет между пожарами. Для пространственных единиц с одним пожарным годом выбирался максимальный по продолжительности период относительно года начала (1987) и окончания (2016) наблюдений. Например, 1996-й пожарный год отстоит от 1987 г. на 9 лет, а от 2016 г. — на 20 лет. Таким образом, в пространственной единице с 1996-м пожарным годом период повторяемости пожаров составляет более 20 лет.

Период повторяемости пожаров современного интервала (*англ.* current, $\overline{cFI}_k$) для пространственной единицы оценивается через среднюю ежегодно пройденную огнём площадь за эталонный интервал. Этот параметр определяется на основе отношения площади лесного участка к периоду повторяемости пожаров эталонного интервала $\overline{rFI}_k$. Вторым шагом оценивается средняя ежегодная пройденная огнём площадь за современный интервал $\overline{cSF}_k$. Этот параметр определяется отношением пройденной огнём площади лесного участка за современный интервал к числу лет n в этом интервале (в нашем случае это 11 лет, 2006–2016 гг.). Третьим шагом оценивается период повторяемости пожаров современного интервала. Для этого вычисляется корректирующий коэффициент CC_k — отношение средней ежегодной пройденной огнём площади за эталонный интервал $\overline{rSF}_k$ к этому же параметру за современный интервал $\overline{cSF}_k$. На заключительном шаге период повторяемости пожаров эталонного интервала $\overline{rFI}_k$ умножается на корректирующий коэффициент CC_k.

Кроме периода повторяемости пожаров современного интервала для классификации пожарного режима пространственной единицы в соответствии с LANDFIRE необходимо определение преобладающей на её территории степени повреждения леса. С этой целью использовались пространственные данные о степени повреждения лесов пожарами. Четыре категории состояния древостоя после пожара были объединены в два класса: с низкой/средней и высокой степенью пирогенного повреждения. К низкой/средней степени повреждения отнесены слабоповреждённые/ослабленные и сильно ослабленные леса, к высокой — усыхающие и погибшие. Далее, в границах пространственных единиц были вычислены суммарные площади двух классов. Пространственной единице картографирования пожарных режимов присваивается преобладающая по суммарной площади степень повреждения (см. *рис. 1*).

Для пространственных единиц, на территорию которых нет данных о степени пирогенного повреждения, полученных на основе спутниковых оценок, но имеются обнаруженные авиацией очаги лесных пожаров, вычислялась суммарная площадь пожаров верхового и низового типа горения. Низкая/средняя степень повреждения считалась преобладающей, если на территории пространственной единицы доминировали низовые пожары. И наоборот, высокая степень повреждения (смена насаждения) определялась преобладающей степенью в случае доминирования верховых пожаров.

На заключительном этапе метода выполняется классификация и картографирование пожарных режимов пространственных единиц cFR в соответствии с LANDFIRE по двум параметрам: преобладающая степень повреждения (низкая или средняя, высокая, отсутствует) и период повторяемости пожаров современного интервала (0–35, 36–200, более 200 лет). Современный пожарный режим не оценивался для тех пространственных единиц, в границах которых пожары за период с 2006 по 2016 г. не зарегистрированы.

Результаты и обсуждение

На основе изложенного выше метода создана карта современных пожарных режимов лесных экосистем России (*рис. 2*). Территории, на которых за исследуемый период пожары не зафиксированы, выделены в отдельный шестой класс, обозначенный на карте тёмно-зелёным цветом (нет пожаров).

Рис. 2. Карта современных пожарных режимов лесных экосистем России

На основе карты растительного покрова (Барталев и др., 2016) был проведён анализ площадей современных пожарных режимов для совокупности всех типов лесных экосистем, а также отдельно для хвойных, лиственных и смешанных лесов (*рис. 3*). Для всех лесов России (см. *рис. 3а*) в период с 2006 по 2016 г. преобладает V класс пожарного режима (34,2 %). На долю I–IV классов приходится 25,5 % покрытой лесом площади. Процент площади лесов II и IV классов пожарных режимов, при которых с высокой долей вероятности происходит гибель древостоя и смена типа растительного покрова, составляет 6,5 % (1,6 % — с периодом повторяемости пожаров 0–35 лет и 4,9 % — 36–200 лет). Площадь лесов, находящихся под воздействием пожаров низкой интенсивности (I и III классы), составляет 19,1 % (10,0 % — с периодом повторяемости пожаров 0–35 лет и 9,1 % — 36–200 лет). Идентичная картина наблюдается для хвойных (см. *рис. 3б*) и лиственных (см. *рис. 3в*) лесов, т. е. высока доля V класса (40,8 и 34,8 % соответственно) и более четверти всех лесов имеют пожарные режимы I–IV классов (27,2 и 27,5 %). В лиственных лесах доля пожарных режимов с высокой степенью повреждения составляет менее 2 %. Вероятно, это связано с вертикальной структурой древостоя (мощностью лесной подстилки, типом живого напочвенного покрова, наличием хвойного подроста) и влажностью основных проводников горения лиственных сообществ.

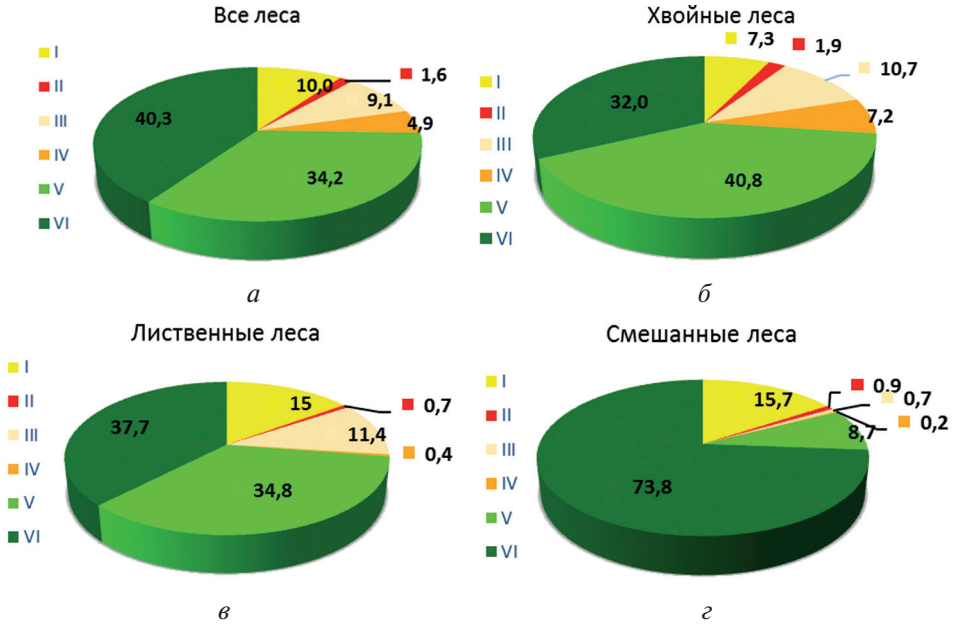

Рис. 3. Распределения площади классов пожарных режимов в различных типах лесов на территории России: *а* — все леса; *б* — хвойные леса; *в* — лиственные леса; *г* — смешанные леса

Следует обратить внимание на класс, к которому отнесены леса, где за последние 10 лет не было зарегистрировано пожаров. На долю этого класса приходится более 40 % всех лесов России (см. *рис. 3а*). Для хвойных лесов этот класс составляет 32 % (см. *рис. 3б*), для лиственных — 37,7 % (см. *рис. 3в*) и смешанных — 73,8 % (см. *рис. 3г*). При этом доля остальных классов равна 26,2 %. Около 16 % смешанных лесов характеризуются пожарным режимом с высокой частотой возникновения пожаров, но низкой или средней интенсивностью. Этот режим приводит к смене доминирующего типа растительного покрова менее чем в 25 % случаев (описание классов в *таблице*). Для выявления причин низкой вероятности возникновения пожаров в лесах необходимо провести дополнительные исследования условий (структуры древостоя, антропогенной нагрузки, уровней охраны и др.), которые могут препятствовать возникновению и распространению лесных пожаров.

В классификации LANDFIRE класс «нет пожаров» отсутствует. При этом, если за исследуемый современный период на территории пространственной единицы не обнаружено лесных пожаров, считается, что для этого участка леса сохранился исторический пожарный режим. Поэтому для территории США выделяют пять различных пожарных режимов, статистический анализ которых приведён ниже. Для того чтобы приблизится к решению этой проблемы на территории России, необходимо разработать методику сбора информации о лесных пожарах, позволяющую расширить временной период для восстановления исторических пожарных режимов. Одним из возможных путей решения этой задачи является использование методов дендрохронологического анализа лесов и ретроспективного анализа восстановительных сукцессий лесов на старых гарях с использованием исторических данных дистанционного зондирования. Это позволило бы значительно расширить временной диапазон наблюдений за лесными пожарами (по крайней мере до начала XX в.) с целью восстановления среднего числа пожаров для эталонного периода ($\overline{rFI_k}$).

Официальный сайт программы LANDFIRE предоставляет возможность получения геопространственных данных картографирования пожарных режимов территории США (https://www.landfire.gov). В настоящее время доступны данные о пожарных режимах в США за 2001 и 2010 гг. Мы провели анализ распределения пожарных режимов США 2010 г. по тем же группам, что и на территории России (*рис. 4*). В качестве карты растительности использовался продукт The Existing Vegetation Type (EVT), полученный по данным Landsat, цифровой модели рельефа и биофизической информации (https://www.landfire.gov/evt.php).

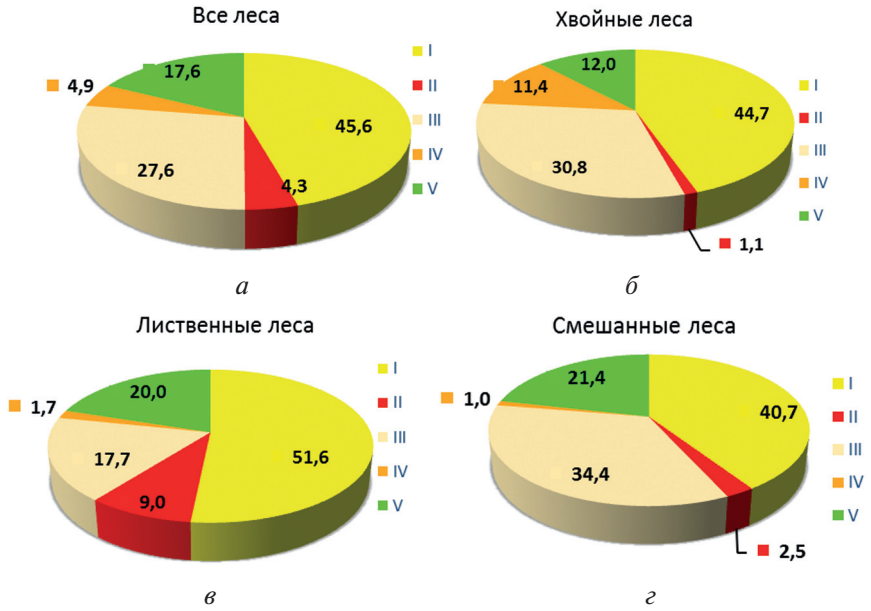

Рис. 4. Результаты статистического анализа распределения классов пожарных режимов на территории США: *а* — все леса; *б* — хвойные леса; *в* — лиственные леса; *г* — смешанные леса

Если рассматривать все леса США, то наблюдается следующее распределение классов пожарных режимов: I класс — 45,6 % лесной территории; II класс — 4,3%; III класс — 27,6 %; IV класс — почти 5 %; V класс — 17,6 % (см. *рис. 4а*). Хвойные леса в основном подвержены воздействию пожаров низкой и смешанной степени повреждения (см. *рис. 4б*). С точки зрения периода повторяемости пожаров преобладают 0–35 лет (44,7 % территории) и 36–200 лет (30,8 % территории), которые соответствуют I и III классам пожарных режимов. Половина (51,6 %) территории лиственных лесов США характеризуется высокой частотой возникновения пожаров (0–35 лет) с низкой степенью пирогенного повреждения (см. *рис. 4в*). В смешанных лесах преобладают I и III классы пожарных режимов, занимающие 40,7 и 34,4 % территории соответственно (см. *рис. 4г*).

Несмотря на то, что проводить сравнение современных пожарных режимов лесных экосистем двух стран достаточно проблематично из-за различий легенды созданной карты с классификацией LANDFIRE, можно сделать ряд выводов. На территории России доля лесов (см. *рис. 3а*) с V классом пожарного режима в два раза больше, чем в США (см. *рис. 4а*). Относительная площадь лесов с IV классом пожарного режима совпадает для двух стран. Остальные классы сильно различаются между собой, что затрудняет их сравнение на данном этапе исследований с точки зрения воздействия огня на экосистемы двух стран. В целом можно сделать предварительный вывод о том, что пожарная нагрузка на лесные экосистемы России меньше, чем в США, что, вероятно, связано с разными климатическими условиями и более низким уровнем доступности лесных территорий в России.

Заключение

Апробирована классификация LANDFIRE для картографирования современных пожарных режимов в лесах России. Учёт периода повторяемости пожаров и степени воздействия огня на леса позволяет оценивать возможность трансформации типов лесного покрова. Отличительной особенностью метода является то, что все участки лесных экосистем на карте растительного покрова России анализируются в пространстве независимо друг от друга относительно очагов пожаров и степени повреждения. Это позволяет добиться максимальной дифференциации классов пожарных режимов при их картографировании. На основе разработанного метода создана карта современных пожарных режимов лесных экосистем России.

Проведённое исследование показало, что для картографирования пожарных режимов территории лесных экосистем России в соответствии с подходом LANDFIRE необходимо расширение эталонного интервала оценки периода повторяемости пожаров. Одним из возможных путей расширения временного интервала является использование исторических данных дендрохронологии и долгосрочных архивов спутниковых наблюдений. В частности, на территорию России доступны данные о хронологии роста деревьев из международной открытой базы данных по дендрохронологии (http://www.ncdc.noaa.gov/data-access/paleoclimatology-data/datasets/tree-ring). Кроме того, есть результаты дендрохронологических исследований на различных локальных территориях, например в Республике Коми (Drobyshev et al., 2004) и Центральной Сибири (Ваганов и др., 1999; Tautenhahn et al., 2016). Однако необходимо разработать методы и систему сбора данных для восстановления исторических пожарных режимов на всей территории России.

Полученные результаты являются основой для выполнения фундаментальных исследований по оценке состояния и прогнозу постпирогенной динамики лесных экосистем, их углеродного баланса, а также биологического разнообразия растительности в условиях меняющегося климата.

Карты пожарных режимов лесных экосистем могут использоваться в практике лесного хозяйства при долгосрочной оценке ресурсного потенциала лесов России, районировании лесного фонда по уровням охраны лесов от пожаров, планировании мероприятий противопожарного обустройства лесов Российской Федерации.

Исследование выполнено при поддержке Российского научного фонда (проект № 19-77-30015). Подготовка и анализ тематических данных для территории США проводились в рамках тематики научных исследований ЦЭПЛ РАН (№ АААА-А18-118052400130-7). При проведении исследования использовалась инфраструктура Центра коллективного пользования «ИКИ-Мониторинг» (Лупян и др., 2015).

Литература

1. *Барталев С. А.*, *Егоров В. А.*, *Ершов Д. В.*, *Исаев А. С.*, *Лупян Е. А.*, *Плотников Д. Е.*, *Уваров И. А.* Спутниковое картографирование растительного покрова России по данным спектрорадиометра MODIS // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2011. Т. 8. № 4. С. 285–302.
2. *Барталев С. А.*, *Стыценко Ф. В.*, *Егоров В. А.*, *Лупян Е. А.* Спутниковая оценка гибели лесов России от пожаров // Лесоведение. 2015. № 2. С. 83–94.
3. *Барталев С. А.*, *Егоров В. А.*, *Жарко В. О.*, *Лупян Е. А.*, *Плотников Д. Е.*, *Хвостиков С. А.*, *Шабанов Н. В.* Спутниковое картографирование растительного покрова России. М.: ИКИ РАН, 2016. 208 с.
4. *Ваганов Е. А.*, *Хьюс М. К.*, *Шашкин А. В.*, *Арбатская М. К.* Дендрохронологические методы в оценке углеродного цикла лесных экосистем // Круговорот углеродного цикла на территории России. М.: Наука, 1999. С. 96–123.
5. *Волокитина А. В.*, *Софронов М. А.* Классификация и картографирование растительных горючих материалов. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2002. 314 с.
6. *Зиганшин Р. А.*, *Воронин В. И.*, *Карбаинов Ю. М.* Мониторинг лесных экосистем Таймыра // Лесная таксация и лесоустройство. 2005. № 2(35). С. 89–95.
7. *Иванов В. А.*, *Коршунов Н. А.*, *Матвеев П. М.* Пожары от молний в лесах Красноярского Приангарья. Красноярск: СибГТУ, 2004. 132 с.
8. *Коровин Г. Н.*, *Андреев Н. А.* Авиационная охрана лесов. М.: Агропромиздат, 1988. 233 с.
9. *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 // Доклады 5-й Всерос. конф. «Аэрокосмические методы и геоинформационные технологии в лесоведении и лесном хозяйстве», посвященной памяти выдающихся ученых-лесоводов В. И. Сухих и Г. Н. Коровина. М.: ЦЭПЛ РАН, 2013. С. 40–43.
10. *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.
11. *Лупян Е. А.*, *Барталев С. А.*, *Балашов И. В.*, *Егоров В. А.*, *Ершов Д. В.*, *Кобец Д. А.*, *Сенько К. С.*, *Стыценко Ф. В.*, *Сычугов И. Г.* Спутниковый мониторинг лесных пожаров в 21 веке на территории Российской Федерации (цифры и факты по данным детектирования активного горения) // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2017. Т. 14. № 6. С. 158–175. DOI: 10.21046/2070-7401-2017-14-6-158-175.
12. *Плотникова А. С.*, *Ершов Д. В.*, *Шуляк П. П.* Анализ статистики пожаров в лесном районе для обоснования выбора пространственной единицы при картографировании пожарных режимов России // Доклады 6-й Всерос. конф. «Аэрокосмические методы и геоинформационные технологии в лесоведении, лесном хозяйстве и экологии». Москва, 20–22 апр. 2016. М.: ЦЭПЛ РАН, 2016. С. 206–207.
13. *Пономарев Е. И.*, *Безматерных П. Ф.*, *Иванов В. А.* Особенности географического распределения пожаров в лесах Средней Сибири // Лесное хозяйство. 2008. № 1. С. 46–47.
14. *Рубцов А. В.*, *Сухинин А. И.*, *Ваганов Е. А.* Классификация территории Сибири по фактической горимости с использованием спутниковых данных // Журн. Сибирского федер. ун-та. Сер. «Биология». 2010. Т. 3. № 1. С. 30–39.
15. *Соколов В. А.*, *Власенко В. И.*, *Втюрина О. П.*, *Поляков В. И.*, *Семечкин И. В.*, *Фарбер С. К.* Динамика лесных экосистем Алтае-Саянского экорегиона // Лесная таксация и лесоустройство. 2005. № 2(35). С. 125–133.
16. *Софронов М. А.*, *Волокитина А. В.* Пирологическое районирование в таежной зоне. Новосибирск: Наука. 1990. 204 с.
17. *Стыценко Ф. В.*, *Барталев С. А.*, *Егоров В. А.*, *Лупян Е. А.* Метод оценки степени повреждения лесов пожарами на основе спутниковых данных MODIS // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2013. Т. 10. № 1. С. 254–266.
18. *Сухинин А. И.*, *Буряк Л. В.*, *Пономарёв Е. И.*, *Бычков В. А.* Геоинформационная система и дистанционные данные применительно к задаче мониторинга нарушенности лесов Нижнего Приангарья // Вестн. Томского гос. ун-та. Прил. 2006. № 18. С. 179–185.
19. *Швиденко А. З.*, *Щепащенко Д. Г.* Климатические изменения и лесные пожары в России // Лесоведение. 2013. № 5. С. 50–61.
20. *Agee J. K.* Fire ecology of Pacific Northwest forests. Washington, D. C.: Island Press, 1993. 493 p.
21. *Barrett S. W.*, *Havlina D.*, *Jones J.*, *Hann W.*, *Frame C.*, *Hamilton D.*, *Schon K.*, *Demeo T.*, *Hutter L.*, *Menakis J.* Interagency Fire Regime Condition Class Guidebook. Version 3.0. 2010. 126 p. URL: https://www.landfire.gov/frcc/frcc_guidebooks.php (Aug. 08, 2018).
22. *Brown J. K.*, *Smith J. K.* Wildland fire in ecosystems: effects of fire on flora. General Technical Report RMRS-GTR-42. V. 2. Ogden. UT: U. S. Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station, 2000. 257 p.
23. *Drobyshev I.*, *Niklasson M.*, *Angelstam P.*, *Majewski P.* Testing for anthropogenic influence on fire regime for a 600-year period in the Jaksha area, Komi republic, East European Russia // Canadian J. Forest Research. 2004. V. 34. No. 10. P. 2027–2036. DOI: 10.1139/X04-081.
24. *Frost C. C.* Presettlement fire frequency regimes of the United States: a first approximation // Tall Timbers Fire Ecology Conf. Proc. V. 20. 1998. P. 70–81.
25. *Hardy C. C.*, *Menakis J. P.*, *Long D. G.*, *Brown J. K.*, *Bunnell D. L.* Mapping historic fire regimes for the western United States: integrating remote sensing and biophysical data // Proc. 7th Forest Service Remote Sensing Applications Conf. Nassau Bay, Apr. 6–10. 1998. Bethesda, MD: American Society for Photogrammetry and Remote Sensing, 1998. P. 288–300.
26. *Heinselman M. L.* Fire in the virgin forests of the Boundary Waters Canoe Area, Minnesota // Quaternary Research. 1973. V. 3. No. 3. P. 329–382.
27. *Kilgore B. M.* Fire in ecosystem distribution and structure: western forests and scrublands // The Bark Beetles, Fuels, and Fire Bibliography. 1981. 81 p.
28. *Morgan P.*, *Hardy C. C.*, *Swetnam T. W.*, *Rollins M. G.*, *Long D. G.* Mapping fire regimes across time and space: Understanding coarse and fine-scale fire patterns // Intern. J. Wildland Fire. 2001. V. 10. No. 4. P. 329–342. DOI: 10.1071/WF01032.
29. *Tautenhahn S.*, *Lichstein J. W.*, *Jung M.*, *Kattge J.*, *Bohlman S. A.*, *Heilmeier H.*, *Prokushkin A.*, *Kahl A.*, *Wirth C.* Dispersal limitation drives successional pathways in Central Siberian forests under current and intensified fire regimes // Global Change Biology. 2016. V. 22. P. 2178–2197. DOI: 10.1111/gcb.13181.

Spatial assessment of modern forest fire regimes in Russia

A. S. Plotnikova[1], D. V. Ershov[1], A. O. Kharitonova[1], P. P. Shulyak[1], S. A. Bartalev[2], F. V. Stytsenko[2]

[1] *Center for Forest Ecology and Productivity RAS, Moscow 117997, Russia*
[2] *Space Research Institute RAS, Moscow 117997, Russia*
E-mail: Alexandra@ifi.rssi.ru

The fire regime determines the conditions of forest fires occurrence, distribution and long-term consequences. The paper presents the results of the assessment of current fire regimes in Russia using the LANDFIRE classification, which contains five classes depending on the fire return interval (less than 35, 36–200 and more than 200 years) and the fire severity (low/medium and high). The study used the following sets of input data: vegetation cover map, created with MODIS spectroradiometer data with a spatial resolution of 250 m; historical data spanning from 1987 to 2011, provided by forest fire protection aviation service; wildfires satellite monitoring multi-annual dataset spanning from 2000 to the present time, available to users of the IKI-Monitoring center for collective use of systems for archiving, processing and analyzing satellite data and long-term data on the fire severity to forests in the four condition categories from 2006 to present, formed on the basis of remote sensing data. The period covered by this study is 30 years — from 1987 to 2016. The basic spatial unit of current fire regimes assessment is a continuous area of the single forest type, according to vegetation cover map. According to LANDFIRE, the method of assessing current fire regimes at the national level is based on an analysis of fire recurrence within two time intervals — reference one and current one, as well as the fire severity to forests, per each spatial unit. In this study, the reference interval covers the period from 1987 to 2016; the current one covers the period from 2006 to 2016. As a result, a map of current fire regimes in Russia was created; the legend of the map contains the class "no fires" in addition to five initial classes of LANDFIRE. On the basis of the obtained results, the analysis of the areas of current fire regimes for all types of forest ecosystems in Russia, as well as separately for needle-leaf, deciduous and mixed forests was carried out. A similar analysis was performed for the spatial dataset related to current USA fire regimes provided by the LANDFIRE website. The study showed that, in order to map fire regimes of Russia in accordance with the LANDFIRE approach, it is necessary to extend the reference interval for estimating the fire return interval.

Keywords: fire regimes, fire return interval, fire severity, forest ecosystems

Accepted: 04.10.2019
DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-5-228-240

References

1. Bartalev S. A., Egorov V. A., Ershov D. V., Isaev A. S., Loupian E. A., Plotnikov D. E., Uvarov I. A., Sputnikovoe kartografirovanie rastitel'nogo pokrova Rossii po dannym spektroradiometra MODIS (Mapping of Russia's vegetation cover using MODIS satellite spectroradiometer data), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2011, Vol. 8, No. 4, pp. 285–302.
2. Bartalev S. A., Stytsenko F. V., Egorov V. A., Loupian E. A., Sputnikovaya otsenka gibeli lesov Rossii ot pozharov (Satellite-based assessment of Russian forest fire mortality), *Lesovedenie*, 2015, No. 2, pp. 83–94.
3. Bartalev S., Egorov V., Zharko V., Loupian E., Plotnikov D., Khvostikov S., Shabanov N., *Sputnikovoe kartografirovanie rastitel'nogo pokrova Rossii* (Land cover mapping over Russia using Earth observation data), Moscow: IKI RAN, 2016, 208 p.
4. Vaganov E. A., Kh'yus M. K., Shashkin A. V., Arbatskaya M. K., Dendrokhronologicheskie metody v otsenke uglerodnogo tsikla lesnykh ekosistem (Dendrochronological methods in assessing the carbon cycle of forest ecosystems), In: *Krugovorot uglerodnogo tsikla na territorii Rossii* (The carbon cycle in Russia), Moscow: Nauka, 1999, pp. 96–123.
5. Volokitina A. V., Sofronov M. A., *Klassifikatsiya i kartografirovanie rastitel'nykh goryuchikh materialov* (Classification and mapping of plant combustible materials), Novosibirsk: Izd. SO RAN, 2002, 314 p.
6. Ziganshin R. A., Voronin V. I., Karbainov Yu. M., Monitoring lesnykh ekosistem Taimyra (Forest ecosystems monitoring in Taimyr), *Lesnaya taksatsiya i lesoustroistvo*, 2005, No. 2(35), pp. 89–95.
7. Ivanov V. A., Korshunov N. A., Matveev P. M., *Pozhary ot molnii v lesakh Krasnoyarskogo Priangar'ya* (Fire from lightning in the forests of Krasnoyarsk Angara), Krasnoyarsk: SibGTU, 2004, 132 p.

8. Korovin G. N., Andreev N. A., *Aviatsionnaya okhrana lesov* (Aviation forest protection), Moscow: Agropromizdat, 1988, 233 p.
9. 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 forest fires and their consequences remote monitoring: the results of the last decade and further prospects), *Aerokosmicheskie metody i geoinformatsionnye tekhnologii v lesovedenii i lesnom khozyaistve* (Aerospace Methods and GIS–Technologies in Forestry and Forest Management), Proc. 5th All-Russia Conf., dedicated to the memory of V. I. Sukhikh and G. N. Korovin, Moscow: TsEPL RAN, 2013, pp. 40–43.
10. Loupian E. A., Proshin A. A., Burtsev M. A., Balashov I. V., Bartalev S. A., Efremov V. Yu., Kashnitskiy 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.
11. Loupian E. A., Bartalev S. A., Balashov I. V., Egorov V. A., Ershov D. V., Kobets D. A., Senko K. S., Stytsenko F. V., Sychugov I. G., Sputnikovyi monitoring lesnykh pozharov v 21 veke na territorii Rossiiskoi Federatsii (tsifry i fakty po dannym detektirovaniya aktivnogo goreniya) (Satellite monitoring of forest fires in the 21st century in the territory of the Russian Federation (facts and figures based on active fires detection)), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2017, Vol. 14, No. 6, pp. 158–175, DOI: 10.21046/2070-7401-2017-14-6-158-175.
12. Plotnikova A. S., Ershov D. V., Shulyak P. P., Analiz statistiki pozharov v lesnom raione dlya obosnovaniya vybora prostranstvennoi edinitsy pri kartografirovanii pozharnykh rezhimov Rossii (Analysis of fire statistics for justification of selection of spatial units for mapping fire regimes in Russia), *Aerokosmicheskie metody i geoinformatsionnye tekhnologii v lesovedenii*, *lesnom khozyaistve i ekologii* (Aerospace Methods and GIS-Technologies in Forestry and Forest Management and Ecology), Proc. 6th All-Russia Conf., Moscow: TsEPL RAN, 2016, pp. 206–207.
13. Ponomarev E. I., Bezmaternykh P. F., Ivanov V. A., Osobennosti geograficheskogo raspredeleniya pozharov v lesakh Srednei Sibiri (Features of the fire geographical distribution in Central Siberia forests), *Lesnoe khozyaistvo*, 2008, No. 1, pp. 46–47.
14. Rubtsov A. V., Sukhinin A. I., Vaganov E. A., Klassifikatsiya territorii Sibiri po fakticheskoi gorimosti s ispol'zovaniem sputnikovykh dannykh (Classification of the Siberia territory by actual burning using satellite data), *J. Siberian Federal University*, *Ser. "Biology"*, 2010, Vol. 3, No. 1, pp. 30–39.
15. Sokolov V. A., Vlasenko V. I., Vtyurina O. P., Polyakov V. I., Semechkin I. V., Farber S. K., Dinamika lesnykh ekosistem Altae-Sayanskogo ekoregiona (Dynamics of forest ecosystems in Altai-Sayan ecoregion), *Lesnaya taksatsiya i lesoustroistvo*, 2005, No. 2(35), pp. 125–133.
16. Sofronov M. A., Volokitina A. V., *Pirologicheskoe raionirovanie v taezhnoi zone* (Forest fire zoning in the taiga), Novosibirsk: Nauka, 1990, 204 p.
17. Stytsenko F. V., Bartalev S. A., Egorov V. A., Loupian E. A., Metod otsenki stepeni povrezhdeniya lesov pozharami na osnove sputnikovykh dannykh MODIS (Post-fire forest tree mortality assessment method using MODIS satellite data), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2013, Vol. 10, No. 1, pp. 254–266.
18. Sukhinin A. I., Buryak L. V., Ponomarev E. I., Bychkov V. A., Geoinformatsionnaya sistema i distantsionnye dannye primenitel'no k zadache monitoringa narushennosti lesov Nizhnego Priangar'ya (Geoinformation system and remote data applied to the monitoring task of forest disturbances in Lower Angara region), *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta*, *Prilozhenie*, 2006, No. 18, pp. 179–185.
19. 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.
20. Agee J. K., *Fire ecology of Pacific Northwest forests*, Washington, D. C.: Island Press, 1993, 493 p.
21. Barrett S. W., Havlina D., Jones J., Hann W., Frame C., Hamilton D., Schon K., Demeo T., Hutter L., Menakis J., *Interagency Fire Regime Condition Class Guidebook*, *Version 3.0*, 2010, available at: https://www.landfire.gov/frcc/frcc_guidebooks.php (Aug. 08, 2018).
22. Brown J. K., Smith J. K., *Wildland fire in ecosystems: effects of fire on flora*, *General Technical Report RMRS GTR 42*, Vol. 2, Ogden, UT: U. S. Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station, 2000, 257 p.
23. Drobyshev I., Niklasson M., Angelstam P., Majewski P., Testing for anthropogenic influence on fire regime for a 600-year period in the Jaksha area, Komi republic, East European Russia, *Canadian J. Forest Research*, 2004, Vol. 34, No. 10, pp. 2027–2036, DOI: 10.1139/X04-081.
24. Frost C. C., Presettlement fire frequency regimes of the United States: A first approximation, *Tall Timbers Fire Ecology Conf. Proc.*, Vol. 20, 1998, pp. 70–81.

25. Hardy C. C., Menakis J. P., Long D. G., Brown J. K., Bunnell D. L., Mapping historic fire regimes for the western United States: integrating remote sensing and biophysical data, *Proc. 7th Forest Service Remote Sensing Applications Conf.*, Nassau Bay, TX, Apr. 6–10, 1998, Bethesda, MD: American Society for Photogrammetry and Remote Sensing, 1998, pp. 288–300.
26. Heinselman M. L., *Fire in the virgin forests of the Boundary Waters Canoe Area*, *Minnesota*, *Quaternary Research 3*, 1973, pp. 329–382.
27. Kilgore B. M., *Fire in ecosystem distribution and structure: western forests and scrublands*, *USDA Forest Service General Technical Report*, 1981, pp. 58–89.
28. Morgan P., Hardy C. C., Swetnam T. W., Rollins M. G., Long D. G., Mapping fire regimes across time and space: Understanding coarse and fine-scale fire patterns, *Intern. J. Wildland Fire*, 2001, Vol. 10, pp. 329–342, DOI: 10.1071/WF01032.
29. Tautenhahn S., Lichstein J. W., Jung M., Kattge J., Bohlman S. A., Heilmeier H., Prokushkin A., Kahl A., Wirth C., Dispersal limitation drives successional pathways in Central Siberian forests under current and intensified fire regimes, *Global Change Biology*, 2016, Vol. 22, pp. 2178–2197, DOI: 10.1111/gcb.13181.