

ВЛИЯНИЕ ЛАНДШАФТНОЙ СТРУКТУРЫ МОРДОВСКОГО ЗАПОВЕДНИКА (РОССИЯ) НА РАСПРОСТРАНЕНИЕ ПОЖАРА 2010 ГОДА

А. О. Харитонов¹ , Т. И. Харитонов² 

¹Центр по проблемам экологии и продуктивности лесов РАН, Россия

e-mail: charitonova-ao@yandex.ru

²Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Россия

e-mail: kharito2010@gmail.com

Поступила: 02.09.2020. Исправлена: 15.02.2021. Принята к опубликованию: 17.02.2021.

Цель исследования состоит в выявлении природных комплексов, которые в катастрофическом пожаре 2010 г послужили естественными барьерами для распространения огня в Мордовском заповеднике (Россия), и в оценке роли ландшафтного соседства в снижении интенсивности огня. В работе исследуются свойства, размеры и сочетания природных комплексов ранга урочища в 200-метровых зонах, в которых происходит либо угасание пожара, либо изменение его интенсивности. Рассматриваются три класса интенсивности пожара, для которых обосновываются полевые и спектральные диагностические признаки. Класс высокой интенсивности дешифрируется на космических снимках по резкому сокращению фитомассы с июня по сентябрь в год пожара. Классы средней и низкой интенсивности дешифрируются по постепенному снижению фитомассы в течение четырех лет после пожара. Таким образом площадь затронутой огнем территории Мордовского заповедника оценена в 151 км². По ландшафтной карте Мордовского заповедника произведен расчет доли разных типов урочищ внутри приграничных зон, с двух сторон примыкающих: 1) к внешнему контуру пожара; 2) к контурам внутренних негоревших островов; 3) к границам, разделяющим пожар высокой интенсивности с пожаром средней и низкой интенсивности. Выяснено, что встречаемость гидроморфных комплексов в 1.5–10.0 раз выше с той стороны рассматриваемых границ, где происходит снижение силы огня. Внутри контура пожара гидроморфные комплексы либо становятся очагами пожара высокой интенсивности за счет больших запасов горючего вещества, либо формируют острова негоревшего леса. Способность гидроморфных комплексов сдерживать и ослаблять огонь зависит не столько от их естественной влажности, сколько от размеров. Была измерена ширина заболоченных и сырых долин по всей их длине с интервалом в 1 км, у заболоченных западин измерен средний диаметр. Расчеты показали, что узкие заболоченные долины малых рек с шириной до 150–160 м не выполняют роли барьеров и полностью сгорают в пожаре высокой интенсивности. Участки долин, ширина которых увеличивается до 170–180 м, служат барьером для пожара слабой интенсивности, но не заметны для огня средней и высокой интенсивности. Речные долины шириной 200–250 м чаще всего сохраняются, но не служат барьером, так как пожар высокой интенсивности переходит на противоположную часть долины и распространяется далее. При встрече с долиной 250–300 м шириной пожар низкой интенсивности останавливается. У более сильного пожара снижается интенсивность. Долины рек шириной более 700 м являются барьером на пути распространения пожара любого типа. Болотные комплексы не выполняют функцию природных барьеров, но их скопление увеличивает ландшафтную неоднородность территории и служит фактором снижения силы огня. В контуре пожара высокой интенсивности средний диаметр болот составляет 32 м, а доля от общей площади контура составляет 0.07%. В контурах пожаров средней и низкой интенсивности увеличиваются линейные размеры болот в среднем до 63–77 м, а их доля от общей площади увеличивается до 0.40–0.59%.

Ключевые слова: Landsat 5, Landsat 8, дистанционное зондирование, интенсивность пожара, ландшафтные метрики, приграничная зона пожара

Введение

Распространение лесных пожаров зависит от триады природных факторов – погодных условий, запасов лесных горючих материалов и рельефа (Agee, 1996; Ryan, 2002). К погодным условиям, определяющим интенсивность и вектор распространения пожаров, относятся, в первую очередь, длительность теплого периода без осадков и скорость ветра. Индексы пожароопасности, рассчитываемые по метеорологическим данным, довольно точно позволяют предсказывать вероятность возгорания и широко используются в государственных си-

стемах контроля лесных пожаров (Курбатский, 1964; Taylor et al., 1996). Огонь, возникающий в условиях сильной засухи и при высокой силе ветра, является катастрофическим событием, практически не имеет природных преград и способен пройти даже крайне увлажненные участки леса. По многим наблюдениям (Agee, 1998; Turner & Romme, 1994), именно влажные леса, в частности пойменные, в таких пожарах становятся главными очагами горения за счет высоких запасов надземной и почвенной биомассы, теряющей свою влагу как в результате засухи, так и за счет тепла от пламени, охва-

тывающего расположенные рядом более сухие массивы леса. Наступление экстремальных погодных условий мы не в силах предотвратить, и можем только учитывать их в борьбе с огнем.

Запасы и состояние лесных горючих материалов в ландшафте являются вторым по значимости фактором динамики пожара, который вступает в силу при менее экстремальных погодных условиях. Интенсивность пожара и его распространение зависят от типа леса и возрастной структуры древостоя. Тип леса (доминирующие породы, ярусное строение, мохово-лишайниковый покров) определяет наличие и запасы легко воспламеняющегося материала. С возрастом деревьев связана их огнестойкость. Огонь теряет свою силу, встречая на своем пути старые деревья с толстой корой и высокой кроной. Поэтому разновозрастная пространственная мозаика леса, создаваемая различными нарушениями, включая вырубку и пожары предыдущих лет, является важным фактором сдерживания огня (Román-Cuesta et al., 2009). Регулирование запасов горючего вещества является наиболее разработанным инструментом противопожарного лесоустройства, подкрепленным наземным и дистанционным мониторингом (Фуряев, Баранов, 1972; Agee, 1996, 2002; Фуряев и др., 2010).

Влияние рельефа на пожароопасную ситуацию изучено хуже. Безусловно, рельеф перераспределяет тепло и влагу и определяет условия потенциального возгорания (Román-Cuesta et al., 2009; Матвеева, Цыкалов, 2010). Вероятно, более интересным и неоднозначным оказывается действие рельефа на скорость и направление ветра. Исследования горных территорий показали, что огонь легче продвигается вверх, чем вниз, что объясняется ростом скоростей ветра ближе к вершинам гребней и тем, что тепло от горения подогревает и дополнительно подсушивает растительную массу, располагающуюся выше по склону (Kushla & Ripple, 1997). Крутизна рельефа влияет на интенсивность огня неоднозначно и чаще не является значимым фактором (Harris & Taylor, 2015). С увеличением крутизны склонов выше определенного порога (так, для Большого Водораздельного хребта Chafer et al. (2004) указывали предельную крутизну склона в 18°) огонь начинает терять силу в связи с тем, что ветер встречает более серьезное препятствие, а также с тем, что с крутизной уменьшается масса напочвенных горючих материалов

(Román-Cuesta et al., 2009). На равнинах выраженная расчлененность рельефа сказывается в увеличении ландшафтной неоднородности территории, которая приводит к усложнению мозаики древостоев, повышению шероховатости поверхности и, в итоге, к снижению скоростей продвижения фронта огня (Turner & Romme, 1994; Ryan, 2002).

Учет совместного действия двух последних факторов при противопожарном устройстве лесов может быть проведен путем анализа ландшафтной структуры территории. Цель исследования состоит в выявлении роли ландшафтной мозаики в сдерживании лесного пожара, а также в ответе на вопросы, какие природные комплексы могут служить естественными барьерами для распространения огня, и как проявляется эмерджентный эффект ландшафтного соседства. Параметры пространственной неоднородности, или метрики, ландшафтного покрова, вычисляемые по космическим снимкам, широко используются для моделирования пожаров (San-Miguel et al., 2017; Ryu et al., 2007; Lee et al., 2009; Román-Cuesta et al., 2009). Основой для анализа в данной работе стали площади и линейные размеры природно-территориальных комплексов ранга урочищ в приграничной полосе контуров пожаров. Для достижения поставленной цели решаются следующие задачи: 1. дешифрирование территорий, пострадавших от пожара различной интенсивности; 2. вычисление параметров ландшафтной структуры в зонах изменения интенсивности или остановки огня; 3. характеристика природных комплексов, повлиявших на силу и распространение огня.

Материал и методы

Полевые исследования

Объектом исследования стал Мордовский государственный природный заповедник им. П.Г. Смидовича (54.42–54.56° N, 43.04–43.36° E). На этой ООПТ летом 2010 г. разряды молний вызвали два автономных пожара, охватившие более 46% территории Мордовского заповедника.

Полевые исследования территории Мордовского заповедника, пострадавшей от пожара 2010 г., проведены летом 2018 г. Маршруты прошли в краевых частях двух гарей в западной и восточной частях Мордовского заповедника. Они включили ландшафтные и ботанические описания в разной степени пострадавших от огня природных комплексов (40 и 25 точек со-

ответственно), выполненные по принятой методике (Жучкова, Раковская, 2004).

Интенсивность пожара определялась по степени повреждения лесных экосистем, которая напрямую зависит от тепловой энергии огня и высоты пламени. Различались несколько классов пожара (Agee, 1998; Morrison & Swanson, 1990). Следствием пожаров высокой интенсивности является полная гибель древостоя и формирование в дальнейшем одновозрастных лесных массивов. При пожарах средней интенсивности преимущественно страдает от огневых и тепловых ожогов стволовая часть взрослых деревьев, и некоторые экземпляры гибнут от полученных ран в течение последующих 5–7 лет, а также происходит полная смена нижних ярусов леса. При пожарах низкой интенсивности древесная растительность повреждается незначительно, на стволах изредка встречаются ожоги, огонь преимущественно затрагивает мхово-лишайниковый и травяной ярусы.

Дешифрирование границ пожара по дистанционным данным

Границы участков разной интенсивности пожара были выделены на основании анализа спектральных характеристик ландшафтного покрова до и после пожара 2010 г. по многоканальным снимкам Landsat 5 и Landsat 8 из открытого каталога Геологической службы США (earthexplorer.usgs.gov). В качестве спектральных показателей состояния древостоя в работе использованы следующие индексы:

1) нормализованный разностный вегетационный индекс (normalised difference vegetation index, NDVI):

$$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED};$$

2) нормализованный пожарный индекс (normalised burn ratio, NBR), по сути, отражающий содержание влаги в растительном покрове:

$$NBR = \frac{NIR - SWIR}{NIR + SWIR},$$

где NIR – отражение в ближнем инфракрасном диапазоне длин волн (0.845–0.885 мкм), RED – отражение в красном диапазоне (0.630–0.680 мкм), SWIR – отражение в коротковолновом инфракрасном диапазоне длин волн (1.560–1.660 мкм).

Наиболее принятым методом выделения пострадавших от огня древостоев является сравнение спектральных индексов, рассчитанных на период вегетации перед пожаром и на

следующий год за пожаром (Johnstone et al., 2011; Барталев и др., 2015). Нами была проанализирована динамика вегетационного индекса (NDVI) и коэффициента отжига (NBR) с 2009 по 2018 гг. на участках полевого описания и выявлен различный характер гибели деревьев в пожарах разной интенсивности (рис. 1). При пожаре высокой интенсивности происходит практически полная потеря листовой массы, что четко читается на космических снимках в первые месяцы после пожара. На следующий год полностью выгоревшие участки обильно зарастают травянистой растительностью, а позже березой (*Betula pubescens* Ehrh., *B. pendula* Roth), и спектральные характеристики довольно быстро восстанавливаются (рис. 1а). При менее интенсивном пожаре древесный ярус не сгорает, но получает термические раны и ожоги и постепенно выпадает в течение нескольких последующих лет. Из-за того, что в таком пожаре не происходит одновременной массовой гибели деревьев, на пострадавших участках не наблюдается резкого падения значений спектральных индексов. Они согласуются с фоновыми значениями, которые также снижаются летом 2010 г. в связи с экстремальными погодными условиями (рис. 1д). Степень повреждения древостоя и, соответственно, участки, затронутые пожаром средней и низкой интенсивности, выявляются по падению кривой пожарного индекса в течение четырех лет после события (рис. 1б,с). На основе проведенного анализа изменения кривых NDVI и NBR на участках, отнесенных в ходе полевого исследования к определенному классу пожара, составлены спектральные диагностические признаки пожаров разной интенсивности (табл. 1).

Выделение границ классов пожаров проводилось последовательно. Сначала на основании принятых диагностических признаков определялись пиксели, соответствующие пожару высокой интенсивности. Затем из оставшихся пикселей отделялись классы пожаров средней и низкой интенсивности. Ход автоматического дешифрирования контролировался визуально по снимкам высокого разрешения Яндекс и Bing, полученных на портале SAS. Планета (www.sasgis.org) и по материалам полевого описания 65 опорных точек (рис. 2). В заключение растровое изображение с распознанными классами пожаров было переведено в векторный формат.

Таблица 1. Полевые и спектральные диагностические признаки пожаров разной интенсивности
Table 1. Field criteria and spectral diagnostic features in recognition of wildfires of different severity

Интенсивность пожара	Спектральные признаки	Полевые признаки
Высокая	Резкое падение вегетационного индекса сразу после пожара. Разница значений NDVI, рассчитанных на 26.06.2010 г. и 30.09.2010 г., составляет от 0.35 до 0.49 соответственно.	Стволы и ветви стоящих и поваленных деревьев обуглены по всей длине, живых деревьев нет, гари зарастают обильно березняком (<i>Betula pubescens</i> , <i>B. pendula</i>).
Средняя	1) Снижение вегетационного индекса на следующий год после пожара в сравнении с годом до пожара (сравниваются сходные по условиям вегетации даты). Разница значений NDVI на 16.07.2009 г. и 22.07.2011 г. составляет 0.08–0.31. 2) Постепенное снижение пожарного индекса в течение нескольких лет после пожара. Разница значений NBR на 22.07.2011 г. и 30.07.2014 г. составляет 0.1–0.14.	Нагар на стволах деревьев прослеживается до высоты 5–7 м. Среди жизнеспособного, но часто угнетенного, древостоя стоят сухие деревья. Много валежника с нагаром. Наличие пироженных видов в травостое, 5–8-летнего подростка сосны (<i>Pinus sylvestris</i> L.) и березы.
Низкая	1) Разница значений NDVI на 16.07.2009 г. и 22.07.2011 г. составляет 0.08–0.31. 2) Разница значений NBR на 22.07.2011 г. и 30.07.2014 г. составляет 0.05–0.1.	Нагар на стволах деревьев прослеживается до высоты 1.5 м. Сухостой крайне редко. Деревья угнетены незначительно. В травостое – наличие пироженных видов.
Торфяной	Затруднено	В почвенном разрезе включения углей и обугленных корней деревьев. Деревья часто угнетены, однако на стволах нагар не обнаружен.
Нет пожара	Снижение значений вегетационного индекса в год пожара, обусловленное экстремальными погодными условиями, и его восстановление в 2011 г. до значений, характерных для 2009 г.	Нагара на стволах деревьев нет. Для почвенного профиля характерен хорошо выраженный горизонт подстилки, в верхних горизонтах включений угля нет.

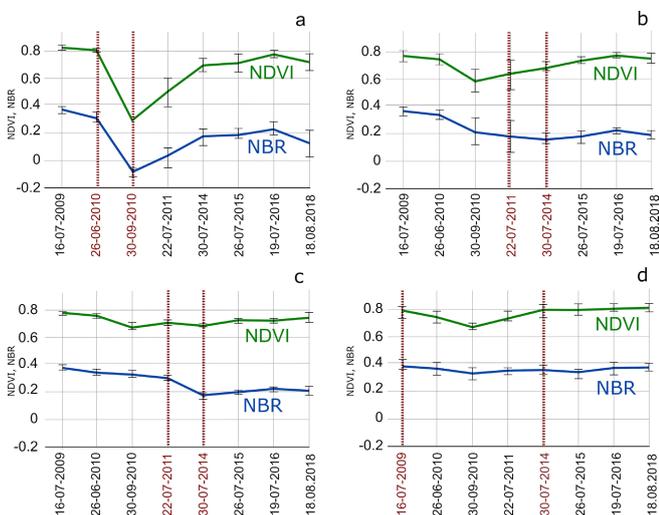


Рис. 1. Изменение спектральных индексов NDVI и NBR после пожара на эталонных участках. Коричневым цветом выделены даты снимков с наибольшей контрастностью значений индексов для каждого класса пожаров: а) пожар высокой интенсивности; б) пожар средней интенсивности; в) пожар низкой интенсивности; д) не пройденные огнем леса.
Fig. 1. Changes in the spectral indices NDVI and NBR after the fire on the reference sites; the years with maximum contrast between spectral index values for each fire class are marked in brown: а) high severity fire; б) moderate severity fire; в) low severity fire; д) unburned forests.

Исследование ландшафтной структуры приграничных зон контуров пожара

Ландшафтная карта масштаба 1:25 000, составленная Дмитрием Куприяновым для территории Мордовского заповедника на уровне групп урочищ (Архив Мордовского заповедника, 2017), была детализирована по снимкам высокого разрешения и дополнена мелкими контурами заболоченных карстовых воронок и эоловых западин, водосборных понижений и ложбин. Расчет доли разных типов урочищ произведен

внутри приграничных зон, примыкающих 1) к внешнему контуру пожара, 2) к контурам внутренних негоревших островов, 3) к границам, разделяющим пожар высокой интенсивности с пожаром средней и низкой интенсивности. С обеих сторон контуров указанных границ в программе SAGA GIS были созданы буферы шириной 30 м, 60 м и 100 м, наложены на ландшафтную карту и внутри буферов рассчитаны площади занимающих их типов урочищ. Далее рассматривалась ландшафтная структура только внутри 100-метровых приграничных зон, так как ландшафтная контрастность в буферах 30 м и 60 м оказалась очень низкой, что, очевидно, связано с недостаточной точностью выделения границ по снимкам Landsat с 30-метровым разрешением и с масштабом ландшафтной карты.

Оценка линейных размеров природных противопожарных барьеров

Линейные размеры долин и заболоченных западин, как потенциальных природных барьеров, были измерены в программе ArcGIS Desktop по всей площади гари и во внешней приграничной зоне. Для долинных комплексов определялась ширина поперечного сечения на каждый отрезок длиной 1 км. Для западин определялся средний диаметр.

Результаты

Границы пожаров в Мордовском заповеднике

Сопоставление результатов автоматической классификации с данными полевого обследования (рис. 2) позволяет заключить, что примененный метод выделения границ по-

жаров различной интенсивности работает с точностью до 91%. При этом общий контур пожара определен максимально достоверно. Большинство ошибок наблюдается при разделении классов пожаров средней и низкой интенсивности. Дешифрирование несколько занизило площадь пожара средней интенсивности, опознав их как пожары низкой интенсивности. Это заметно проявляется в восточной части Мордовского заповедника.

Общая площадь возгорания в 2010 г. в границах Мордовского заповедника составила 151 км², что соответствует 46% его площади. Пожар высокой интенсивности охватил территорию в 85 км², средней интенсивности – 21 км², низкой интенсивности – 41 км².

Из особенностей распространения пожара следует отметить линейность части его границ, совпадающих с дорогами и границами квартальной сети, по которым подводилась пожарная техника. Антропогенно-обусловленные границы составляют 25% от протяженности выделенного общего контура пожара. Они в работе не рассматривались.

Ландшафтная структура территории Мордовского заповедника

Самую большую площадь в Мордовском заповеднике занимают свежие и сухие урочища водноледниковых равнин с елово-сосновыми чернично-брусничными ландышево-орляковыми лесами (*Piceeto-pineta convallariosa-pteridoso-myrttillosa*) на дерново-подзолах и эолово-водноледниковых равнин с сосновыми ландышевыми беломошно-зеленомошными (*Pineta convallariosa-cladinosa-hylocomiosa*) лесами на подзолах. Эти урочища пострадали больше всего при пожаре 2010 г., потеряв в огне 60% и 84% площади своих лесов, соответственно (табл. 2).

Наиболее извилистая граница пожара характерна для западной части Мордовского заповедника, отличающейся высоким ландшафтным разнообразием. В восточной части общий контур пожара имеет в значительной мере антропогенно обусловленную конфигурацию, но внутренние границы между пожарами разной интенсивности также составляют сложный узор.

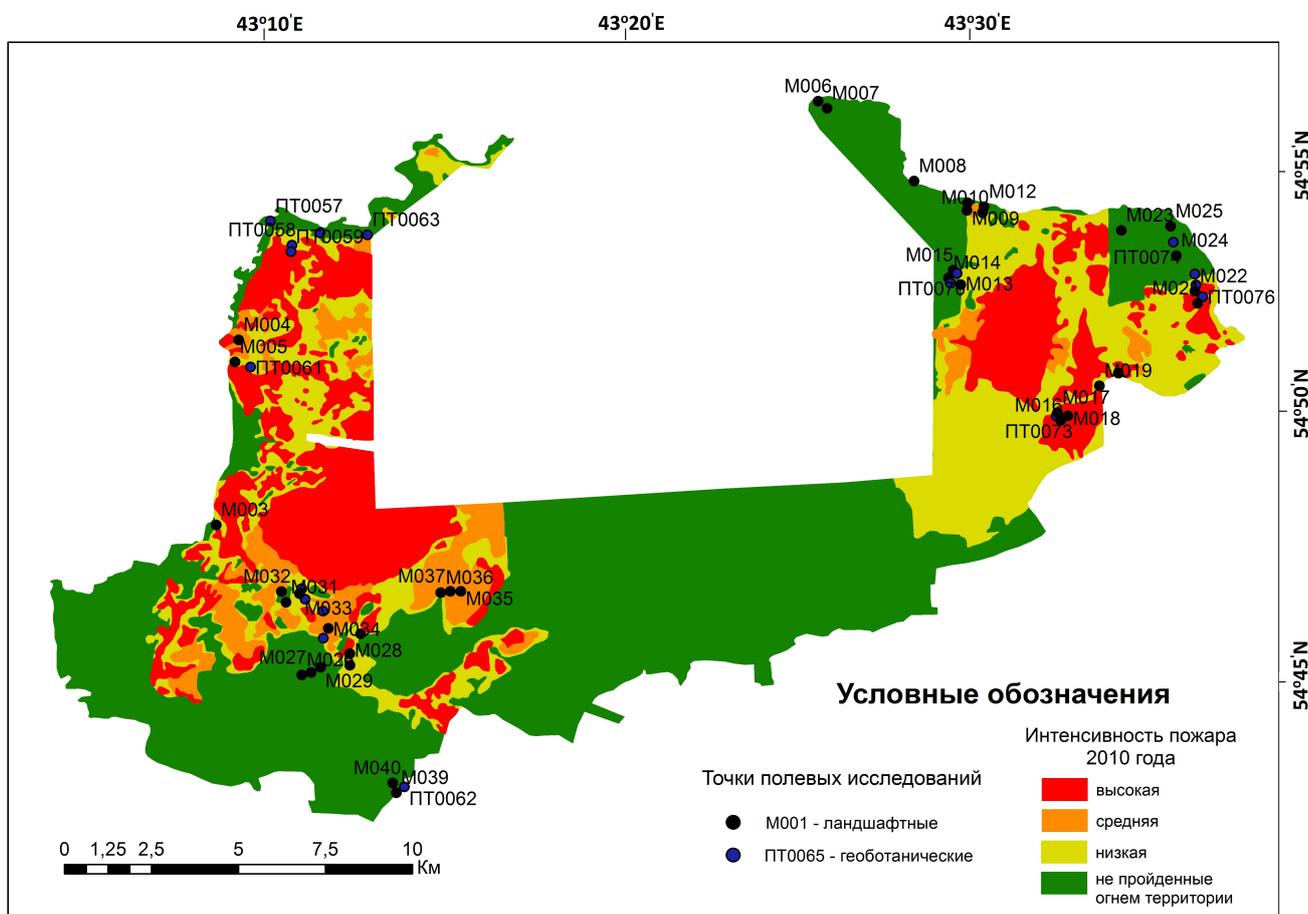


Рис. 2. Карта интенсивности пожара в Мордовском заповеднике (Россия).
 Fig. 2. Map of fire severity in Mordovia State Nature Reserve (Russia).

Таблица 2. Типы урочищ, общая площадь, занимаемая ими в Мордовском заповеднике, и площадь, пройденная огнем в 2010 г.
Table 2. Geosystem types, their total area in the Mordovia State Nature Reserve, and their area disturbed by wildfire in 2010

№	Типы урочищ	Общая площадь, км ²	Пройденная огнем площадь	
			км ²	% от общей площади
1	Моренно-водноледниковые закарстованные равнины с дерново-подбурами глееватыми под сосново-липовыми с участием ели (<i>Picea abies</i>), с густым подлеском широколиственными лесами.	2.01	–	–
2	Моренно-водноледниковые равнины с дерново-подзолами глееватыми под сосново-еловыми с липой (<i>Tilia cordata</i> Mill.) и дубом (<i>Quercus robur</i> L.) во втором ярусе, с густым подлеском злаково-разнотравными лесами.	24.61	1.19	5
3	Моренно-водноледниковые пологонаклонные равнины с дерново-подзолами глееватыми и глеевыми под елово-сосновыми черничными зеленомошными лесами.	46.33	17.88	38
4	Моренно-водноледниковые равнины с дерново-подзолами глеевыми под сосново-еловыми с густым подлеском черничными молиниевыми зеленомошными лесами.	1.80	–	–
5	Водноледниковые равнины с подзолами и подбурами оторфованными глеевыми под сосновыми голубично-черничными молиниевыми сфагновыми лесами.	0.27	–	–
6	Водноледниковые равнины с дерново-подзолами и подзолами под елово-сосновыми чернично-брусничными ландышево-орляковыми лесами.	56.54	34.01	60
7	Эолово-водноледниковые грядово-бугристые равнины с подзолами под сосновыми ландышевыми беломошно-зеленомошными лесами.	50.24	42.91	84
8	Эоловые песчаные всхолмления с подзолами под сосновыми и зеленомошно-беломошными лесами.	0.45	0.01	2
9	Эолово-водноледниковые равнины с подзолами и подбурами глееватыми под сосняками брусничными орляково-ландышевыми зеленомошно-беломошными.	0.83	–	–
10	Цокольная III надпойменная терраса, подстилаемая мореной, с серо-гумусовыми глееватыми почвами под липовыми с участием сосны и ели широколиственными лесами.	10.30	3.46	33
11	III надпойменная терраса с дерново-подзолами и подзолами под елово-сосновыми чернично-брусничными зеленомошными лесами.	29.87	16.10	53
12	II надпойменная терраса с дерново-подзолами глееватыми под сосновыми с елью и дубом черничными осоково-ландышевыми зеленомошными лесами.	32.61	16.13	49
13	I надпойменная терраса с серогумусовыми почвами и дерново-подбурами глееватыми под осиново-липовыми (<i>Tremuleto-tilieta</i>) с густым подлеском осоково-широколиственными лесами.	13.56	7.88	57
14	I надпойменная терраса заболоченная с торфяно-глеевыми почвами под черноольшанниками (<i>Alnus glutinosa</i> (L.) Gaertn.) с участием дуба.	8.36	0.03	< 1
15	Структурная терраса, сложенная известняками и маломощными песками, с серогумусовыми почвами под сосново-липовыми широколиственными лесами.	0.27	–	–
16	Поймы заболоченные с аллювиальными перегнойно-глеевыми почвами под дубовыми с участием черной ольхи и липы влажнотравными лесами.	18.00	0.15	<1
17	Поймы с аллювиальными дерновыми супесчаными и суглинистыми глеевыми почвами под злаково-крупнотравными лугами с порослью ив и ольхи черной.	3.12	0.03	1
18	Стародонья заторфованные с торфянисто-глеевыми почвами под черноольшанниками с участием дуба и влажнотравными лугами.	1.10	–	–
19	Межстаричные протоки с дерновыми глеевыми почвами, обводненные, с влажнотравными лугами.	0.015	–	–
20	Староречья обводненные.	0.69	–	–
21	Поймы с аллювиальными перегнойно-глеевыми и бурными лесными глеевыми почвами под липово-черноольховыми с участием дуба и осины (<i>Populus tremula</i> L.) осоково-влажнотравными лесами.	8.59	2.68	31
22	Долины малых рек с перегнойно-глеевыми почвами и дерново-подбурами глеевыми под черноольховыми с участием сосны, липы, дуба и ели влажнотравными лесами.	4.53	3.04	66
23	Долины малых рек с дерново-подзолистыми глеевыми почвами под сосново-липовыми с густым подлеском злаково-разнотравными лесами.	1.11	0.56	50
24	Ложбины, выполненные мощными торфами под елово-сосновыми черничными пушицево-щитовниково-кисличными сфагновыми лесами.	0.36	0.13	35
25	Водосборные понижения с дерново-подбурами глеевыми под осиновыми с участием липы и сосны, с густым подлеском, широколиственными лесами.	1.31	–	–
26	Водосборные понижения с дерново-подзолистыми глееватыми почвами под еловыми с участием сосны и липы разнотравными зеленомошными лесами.	3.28	2.30	69
27	Болота низинные (местами в карстовых воронках) болотнотравно-осоковые с редкой порослью ив.	2.24	1.45	64
28	Болота верховые сфагновые с болотными кустарничками и березово-сосновым редколесьем.	2.69	0.93	34

В приграничной зоне самую большую площадь занимают песчаные террасы с сосновыми с елью и дубом лесами (рис. 3а: №12). Также существенную площадь занимают песчано-суглинистые террасы с осиново-липовыми осоково-широколиственными влажными лесами (рис. 3а: №13). Отметим,

что осиново-липовые леса на глееватых почвах, относящиеся по классификации пожароопасности (Приказ Рослесхоза..., 2011) к малоопасным, в условиях экстремальных погодных условий 2010 г. не задержали распространение пожара и занимают большую площадь внутри контура гарей.

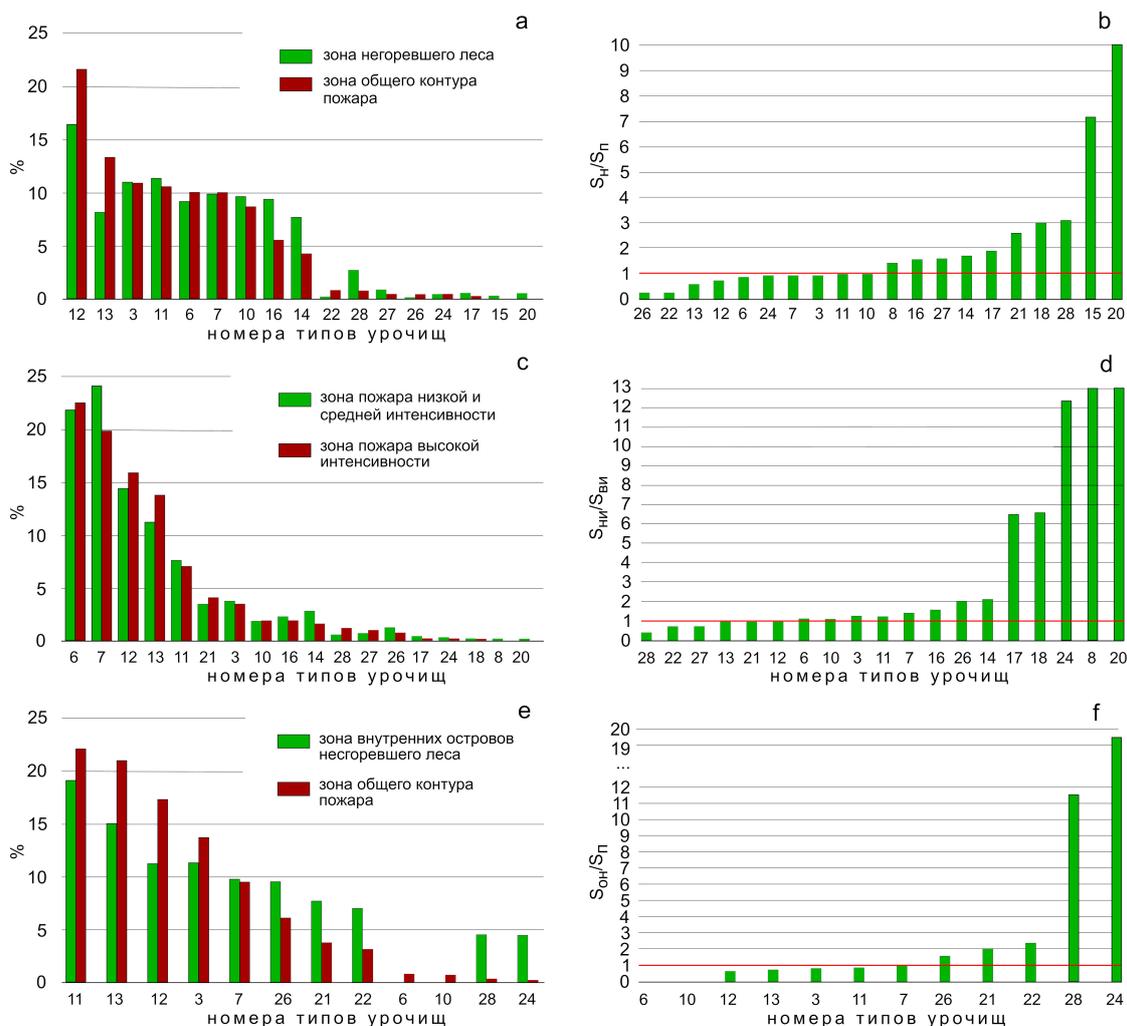


Рис. 3. Набор типов урочищ в 100-метровых приграничных зонах, примыкающих с двух сторон к границам пожара разной интенсивности. Обозначения: а) распределение доли (%) площадей типов урочищ в приграничной зоне между общим контуром пожара и негоревшим лесом; б) соотношение площадей типов урочищ в зоне негоревшего леса ($S_{\text{н}}$) к их площади внутри общего контура пожара ($S_{\text{п}}$); в) распределение доли (%) площадей типов урочищ в приграничной зоне между пожаром высокой и меньшей (средней и низкой) интенсивности; д) соотношение площадей типов урочищ в зоне меньшей (средней и низкой) интенсивности пожара ($S_{\text{ни}}$), к их площади в зоне пожара высокой интенсивности ($S_{\text{ви}}$); е) распределение доли (%) площадей типов урочищ в приграничной зоне между внутренними островами негоревшего леса и общим контуром пожара; ф) соотношение площадей типов урочищ в зоне островов негоревшего леса ($S_{\text{он}}$), к их площади внутри общего контура пожара ($S_{\text{п}}$); по оси X указаны номера контуров типов урочищ согласно ландшафтной карте Д. Куприянова (см. табл. 2).

Fig. 3. Geosystem types in 100-m zones adjacent to both sides of the boundaries between areas damaged by the different fire severity. Designations: a) distribution of the proportion (%) of the geosystem areas in the boundary zone between the general fire perimeter and the unburned area; b) ratio of the geosystem areas in the zone of unburned forest ($S_{\text{н}}$) to their area within the general fire perimeter ($S_{\text{п}}$); c) distribution of the proportion (%) of the geosystem areas in the boundary zone between higher and lower (moderate and low) fire severity; d) ratio of the geosystem areas in the zone of the lower (moderate and low) fire severity ($S_{\text{ни}}$) to their area in the high-severity fire zone ($S_{\text{ви}}$); e) distribution of the proportion (%) of the geosystem areas in the boundary zone between the inner unburned forest «islands» and the general fire perimeter; f) the ratio of the geosystem areas in the zone of the unburned forest «islands» ($S_{\text{он}}$) to their area within the general fire perimeter ($S_{\text{п}}$); the X axis indicates numbers of the geosystem types according to the landscape map of Dmitry Kupriyanov (see Table 2).

Реже встречающимися урочищами и тяготеющими к внешнему контуру пожаров являются гидроморфные комплексы. К ним относятся заболоченные поверхности низких надпойменных террас с черноольховыми с участием дуба влажнотравными лесами (рис. 3а: №14), заболоченные поймы с дубовыми с участием черной ольхи и липы лесами (рис. 3а: №16), верховые сфагновые болота с березово-сосновым

редколесьем (рис. 3а: №28). Встречаемость гидроморфных комплексов за пределами контура пожара в 1.5–3.0 раза выше, чем внутри контура (рис. 3б), но их эффективность в сдерживании огня зависит от их размеров.

К редким урочищам малой площади относятся обводненные староречья (рис. 3б: №20), участки структурной террасы, сложенной известняками, с сосново-липовыми с участием дуба и клена

широколистными лесами (рис. 3b: №15). Они встречаются в 7–10 раз чаще вне контура пожара и, очевидно, играют важную сдерживающую роль, хоть и на коротких участках границы.

Пожар высокой интенсивности отличает переход огня на кроны деревьев. Этому благоприятствуют большие запасы горючих материалов в нижнем ярусе леса и повышенные скорости ветра. В приграничной зоне между пожаром высокой и меньшей (средней и низкой) интенсивности мы видим, что развитие пожаров высокой интенсивности более характерно для гидроморфных урочищ с высокими запасами органики: верховых сосново-березовых редколесных и низинных кустарниковых болот (рис. 3c,d: №27, №28, соответственно), долин малых рек с черноольховыми с участием сосны, липы, дуба и ели влажнотравными лесами (№22). Одновременно, большие площади, пострадавшие от пожара этого класса, составили урочища эолово-водноледниковых равнин с сосновыми ландышевыми белоомшно-зеленомшными лесами (рис. 3c: №7), т.е. леса, практически лишённые подлеска. Снижение силы огня происходит в урочищах эоловых всхолмлений с сосновыми и зеленомшно-белоомшными лесами (№8), а также в мелкоконтурных понижениях рельефа (обводненных староречьях (№20), заболоченных ложбинах (№24) и стародоньях (№18)), то есть на территориях, где рельеф и шероховатость поверхности создают предпосылки для уменьшения скорости ветра. В природных комплексах, лишённых древесной растительности, пожар также переходит в менее интенсивную форму (№17, луговые поймы).

На планах лесонасаждений лесничеств Мордовского заповедника от 2013 г. показаны более обширные площади островов леса, сохранившихся после пожара 2010 г., чем было определено нами на основании дешифрирования серии космических снимков, включающих сцены 2014 г.

Полевые исследования 2018 и 2020 гг. установили, что многие островные массивы леса, отмеченные на планах как сохранившиеся, были пройдены пожарами низкой и средней интенсивности, и к настоящему времени погибли в результате полученных ранений и деятельности насекомых. Острова, выявленные в нашем исследовании, сформированы при весомом участии гидроморфных урочищ. Главным образом, это верховые сфагновые болота с сосновым редколесьем (рис. 3e,f: №28) и заболоченные ложбины, выполненные мощными торфами с елово-сосновыми сфагновыми лесами (№24), а также долины малых рек (№22), поймы с липово-черноольховыми влажнотравными лесами (№21) и водосборные понижения с ельниками с участием сосны и липы (№26).

Всего внутри общего контура пожара было дешифрировано 40 островов непострадавшего леса площадью от 0.002 км² до 0.29 км². Их средняя площадь составила 0.046 км². В основном такие участки находятся в зоне воздействия пожара средней и слабой интенсивности.

Линейные размеры природных барьеров в Мордовском заповеднике

Исследованные долины рек и ручьев по степени гидроморфизма разделились на два класса – заболоченные и сырые, по размерам – на узкие (50–310 м) и широкие (670–1720 м). Из 115 измеренных участков долин 52 участка самых узких заболоченных долин (до 167 м) попали в контур пожара высокой интенсивности и полностью выгорели (табл. 3).

Размеры заболоченных котловин, попавших в зону пожара, не превышают 300 м в диаметре. Средний диаметр и общая площадь болот в контуре пожара высокой интенсивности минимальные – 32 м и 0.057 км² соответственно (табл. 3). Диаметр и площадь болот заметно увеличиваются в контурах гарей средней и низкой интенсивности. Их доля в общей площади гарей также растет и составляет 0.59% и 0.40% соответственно.

Таблица 3. Ширина долин рек и ручьев, расположенных в контуре гари и в непосредственной близости к ней
Table 3. The width of the valleys of rivers and brooks, located within the fire perimeter and in a close proximity to this area

Положение	Количество измеренных участков долин	Ширина долин, м	
		Средняя	Диапазон
Заболоченные долины			
В контуре гари высокой интенсивности	52	110	50–167
В контуре гари, на границе между пожаром высокой и средней или низкой интенсивности	21	173	169–180
За пределами контура гари, на границе с пожаром низкой интенсивности	18	281	250–310
Сырые долины			
Остров в контуре гари	9	230	203–247
За пределами контура гари, на границе с пожаром высокой, средней и низкой интенсивности	15	1066	670–1720

Таблица 4. Средний диаметр и общая площадь болот, расположенных в контуре гари и в непосредственной близости к ней
Table 4. Average diameter and total area of mires within the fire perimeter and in close proximity to this area

Положение	Количество болот	Средний диаметр болот, м	Диапазон, м	Общая площадь, км ²	Доля от площади гари, %
В контуре гари пожара высокой интенсивности	73	32	13–109	0.057	0.07
В контуре гари пожара средней интенсивности	31	77	18–300	0.145	0.59
В контуре гари пожара низкой интенсивности	52	63	12–200	0.163	0.40
Вблизи внешнего контура пожара	21	33	10–87	0.018	–

Обсуждение

Можно видеть, что пожар 2010 г. в Мордовском заповеднике не был избирательным. В контур пожара высокой интенсивности попали как заболоченные леса, так и чистые сосновые боры, лишённые подлеска, в которых, судя по исследованиям Мелехова (1947), пожар должен был бы перейти в низовой тип, распространяясь по мохово-лишайниковому ярусу и не затрагивая кроны деревьев. В ряде случаев пожар высокой интенсивности не стихал постепенно, переходя с крон на нижние ярусы, а резко останавливался, и часто барьерную функцию здесь выполняли заболоченные урочища. Сохранившиеся острова негоревшего леса также чаще всего связаны с влажными местообитаниями, что отмечают и другие авторы (например, Арцыбашев, 2014). Одновременно выгорело 64% площади низинных болот и более половины площади влажных и сырых лесов в долинах малых рек. Возможность подобного развития событий была показана Осиповым (2012), который наблюдал пересыхание целых озёр в заповеднике «Приволжская Лесостепь» во время пожара 2010 г. Таким образом, независимо от исходной степени гидроморфизма, заболоченные леса служили как проводниками и очагами пожаров, так и островами и барьерами на пути огня.

Курбатским (1972) было экспериментально показано, что без поддержки снизу пламя не может продвигаться по кронам длительное время и затухает на расстоянии 80–150 м от фронта низового огня. На этом основан принцип тушения лесных пожаров путем встречного наземного пала. Наши расчеты показали, что узкие заболоченные долины малых рек с шириной до 150–160 м не выполняют роли барьеров, и полностью сгорают в пожаре высокой интенсивности. Участки долин, ширина которых увеличивается до 170–180 м, служат барьером для пожара слабой интенсивности,

но не заметны для огня средней и высокой интенсивности. Влажные леса речных долин шириной до 200–250 м чаще всего сохраняются, но не служат барьером, так как пожар высокой интенсивности переходит на противоположную часть долины и распространяется далее. Было установлено, что лощины и долины рек начинают выполнять существенную противопожарную роль, когда их ширина достигает 250 м. При встрече с долиной 250–300 м шириной пожар низкой интенсивности останавливается, сильный пожар теряет силу. Долины рек шириной более 700 м являются барьером на пути распространения пожара любого типа.

В силу своих геометрических особенностей замкнутые заболоченные западины редко являются реальными барьерами на пути пожара, который либо захватывает их, либо легко обтекает по сторонам. Как было показано выше, внутри контуров пожаров высокой интенсивности болота горят очень хорошо, а внутри контуров пожаров средней и низкой интенсивности заболоченные западины формируют острова неповрежденного леса. Многие исследователи отмечают, что влияние топографии на распространение огня становится заметным только при пожарах средней и низкой интенсивности, в то время как поведение сильного огня описывается физическими, а не географическими законами (Swanson, 1981; Turner & Romme, 1994; Agee, 1998). Но нами было установлено, что роль болотных комплексов в ландшафтной структуре территорий, охваченных пожаром разной интенсивности, различна. Так, в контуре пожара высокой интенсивности средний диаметр болот составляет 32 м, а доля от общей площади контура 0.07%. В то время как на менее пострадавших от огня территориях, во-первых, линейные размеры болот увеличиваются до 63–77 м в среднем и до 200–300 м максимально, а во-вторых, их присутствие увеличивается до 0.40–0.59% от общей площади.

Острова неповрежденного леса чаще всего образуют скопления в области распространения как заболоченных, так и относительно сухих западин карстового и эолового генезиса, а также на бугристых поверхностях водноледниковых равнин. Мы считаем, что здесь лес сохраняется не столько в результате того, что при снижении интенсивности огня проявляются различия в условиях его распространения, сколько в результате того, что мелкоконтурная и неоднородная ландшафтная структура оказывает влияние на местные условия циркуляции воздуха, что приводит к снижению интенсивности огня и ущерба от пожара.

Таким образом, наименее уязвимыми для пожара природными комплексами стали широкие заболоченные поймы и низкие террасы рек Пушта, Сатис и Арга с дубово-черноольховыми лесами на торфянисто- и перегнойно-глеевых почвах. Именно эти комплексы выступили барьерами для распространения пожара в западной и северной части Мордовского заповедника (рис. 4).

В восточной части Мордовского заповедника не наблюдается очевидных природных барьеров на пути распространения пожара. Система долин р. Саровки и ее притоков с черноольховыми лесами на перегнойно-глеевых почвах находятся в центре пожара высокой интенсивности. Ширина долин не превышает 100 м, и природные комплексы полностью и частично выгорают. Здесь проходит шоссе и полоса отвода железной дороги общей шириной 52 м, которые также не служат ни преградой, ни фактором ослабления огня. К югу восточного участка пожара увеличивается плотность карстовых и эоловых западин, огонь теряет свою силу и останавливается грунтовой дорогой. При высокой концентрации карстовые воронки болотно-осоковые с редкой порослью ив (*Salix* spp.) и эоловые западины сфагновые с болотными кустарничками и березово-сосновым редколесьем становятся также малоуязвимыми для пожара.

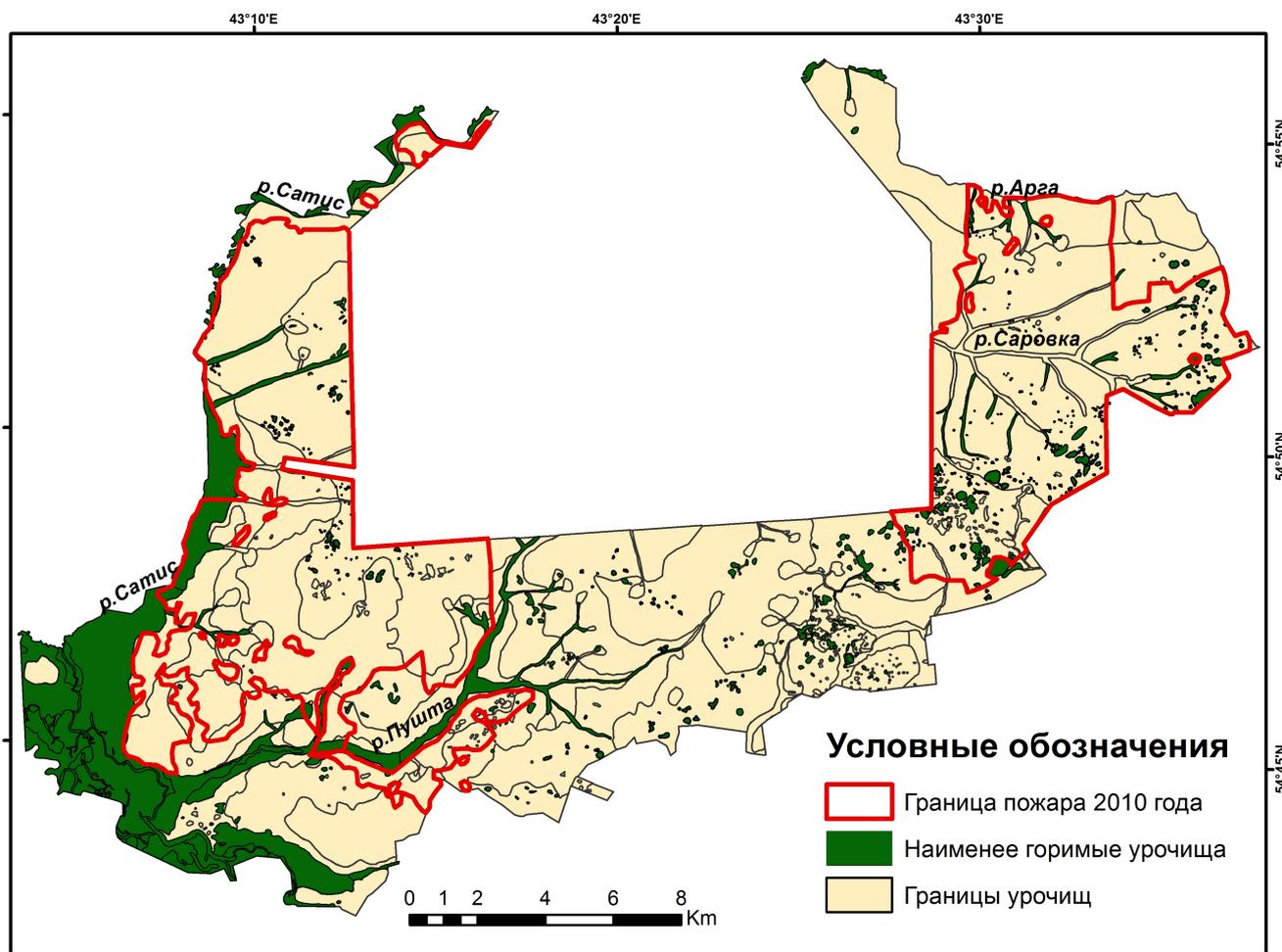


Рис. 4. Распространение урочищ, наименее уязвимых к пожару, в ландшафтной структуре Мордовского заповедника (Россия).
Fig. 4. Spatial distribution of geosystems least vulnerable to the wildfire influence in the landscape structure of the Mordovia State Nature Reserve (Russia).

Заключение

При пожаре высокой интенсивности лесные экосистемы очень быстро теряют большой объем фитомассы. Это хорошо распознается на космических снимках, полученных в первые месяцы после пожара. В пожаре средней и низкой интенсивности древесный ярус не выгорает, но многие деревья получают ожоги, становятся уязвимыми для насекомых и погибают в последующие за пожаром годы. Территории, пройденные огнем средней и низкой интенсивности, плохо распознаются на космических снимках в год пожара, но они хорошо дешифрируются на снимках спустя четыре года после пожара, когда потери фитомассы становятся очевидными на фоне бурно восстанавливающейся растительности на полностью выжженных пространствах. Использование пятилетнего (2010–2014 гг.) ряда снимков позволило нам дешифрировать границы пожаров различной интенсивности с точностью в 91%.

При анализе ландшафтной структуры приграничной полосы пожаров различной интенсивности было выявлено, что заболоченные и сырые долины способны выполнять функцию природного противопожарного барьера. Но их эффективность зависит не столько от естественной влажности, сколько от их размеров. Долины и лощины останавливают слабый пожар и снижают интенсивность сильного огня при ширине 250–300 м. Более узкие долины, наоборот, становятся очагами пожара высокой интенсивности за счет больших запасов горючего вещества. Речные долины шириной 700 м останавливают продвижение пожара любой интенсивности. Отдельные болотные комплексы небольших размеров (32–77 м в диаметре) мало меняют поведение огня. Но нами было замечено, что на участках пожаров средней и низкой интенсивности концентрация заболоченных западин заметно выше, чем на участках, пройденных сильным огнем. Так как в экстремальных погодных условиях распространение огня зависит от скорости ветра, можно предположить, что повышение шероховатости поверхности за счет скопления эоловых и карстовых западин ослабляет ветер. Таким образом срабатывает эмерджентный эффект ландшафтного соседства, приводящий к ослаблению огня.

Благодарности

Авторы выражают искреннюю благодарность руководству ФГБУ «Заповедная Мордовия» за возможность проведения полевых работ на территории исследования.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта №20-05-00234.

Литература

- Арцыбашев Е.С. 2014. Влияние пожаров на лесные биогеоценозы // Биосфера. Т. 6(1). С. 53–59.
- Бартаев С.А., Стыщенко Ф.В., Егоров В.А., Лупян Е.А. 2015. Спутниковая оценка гибели лесов России от пожаров // Лесоведение. №2. С. 83–94.
- Жучкова В.К., Раковская Э.М. (ред.). 2004. Методы комплексных физико-географических исследований. М.: Академия. 368 с.
- Курбатский Н.П. 1964. Проблема лесных пожаров // Возникновение лесных пожаров / Н.П. Курбатский (ред.). Москва: АН СССР. С. 5–60.
- Курбатский Н.П. 1972. Виды отжига и их применение для локализации лесных пожаров // Вопросы лесной пирологии / Н.П. Курбатский, Э.В. Конев (ред.). Красноярск: ИЛиД. С. 153–169.
- Матвеева Т.А., Цыкалов А.Г. 2010. Роль рельефа в формировании запасов лесных горючих материалов // Хвойные бореальной зоны. Т. 27(3–4). С. 327–329.
- Мелехов И.С. 1947. Природа леса и лесные пожары. Архангельск: ОГИЗ. 60 с.
- Осипов В.В. 2012. Аннотированный каталог круглоротых и рыб заповедника «Приволжская лесостепь» // Труды Мордовского государственного природного заповедника им. П.Г. Смидовича. Вып. 10. С. 272–281.
- Приказ Рослесхоза от 05.07.2011 №287 «Об утверждении классификации природной пожарной опасности лесов и классификации пожарной опасности в лесах в зависимости от условий погоды» // Российская газета. 2011. №186. Доступно через: <https://rg.ru/2011/08/24/pojari-dok.html>
- Фурьяев В.В., Баранов Н.М. 1972. О точности учета количества напочвенных лесных горючих материалов // Вопросы лесной пирологии / Н.П. Курбатский, Э.В. Конев (ред.). Красноярск: ИЛиД. С. 164–170.
- Фурьяев В.В., Черных В.А., Злобина Л.П. 2010. Роль подроста в формировании комплекса лесных горючих материалов и снижении пожароустойчивости ленточных боров Алтая // Лесоведение. №3. С. 15–20.
- Agee J.K. 1996. The influence of forest structure on fire behavior // Proceedings of the 17th annual forest vegetation management conference. Redding, CA: University of California. P. 52–68.
- Agee J.K. 1998. The landscape ecology of western forest fire regimes // Northwest Science. Vol. 72(17). P. 24–34.
- Agee J.K. 2002. The fallacy of passive management managing for firesafe forest reserves // Conservation in Practice. Vol. 3(1). P. 18–26. DOI: 10.1111/j.1526-4629.2002.tb00023.x
- Chafer C.J., Noonan M., Macnaught E. 2004. The post-fire measurement of fire severity and intensity in the Christmas 2001 Sydney wildfires // International Journal of Wildland Fire. Vol. 13(2). P. 227–240. DOI: 10.1071/WF03041
- Harris L., Taylor A.H. 2015. Topography, fuels, and fire exclusion drive fire severity of the Rim Fire in an old-growth

- mixed-conifer forest, Yosemite National Park, USA // *Ecosystems*. Vol. 18(7). P. 1192–1208. DOI: 10.1007/s10021-015-9890-9
- Johnstone J.F., Rupp T.S., Olson M., Verbyla D. 2011. Modeling impacts of fire severity on successional trajectories and future fire behavior in Alaskan boreal forests // *Landscape Ecology*. Vol. 26(4). P. 487–500. DOI: 10.1007/s10980-011-9574-6
- Kushla J.D., Ripple W.J. 1997. The role of terrain in a fire mosaic of a temperate coniferous forest // *Forest Ecology and Management*. Vol. 95(2). P. 97–107. DOI: 10.1016/S0378-1127(97)82929-5
- Lee S.W., Lee M.B., Lee Y.G., Won M.S., Kim J.J., Hong S.K. 2009. Relationship between landscape structure and burn severity at the landscape and class levels in Samchuck, South Korea // *Forest Ecology and Management*. Vol. 258(7). P. 1594–1604. DOI: 10.1016/j.foreco.2009.07.017
- Morrison P.H., Swanson F.J. 1990. *Fire history and pattern in a Cascade Range landscape*. Portland, USA: Department of Agriculture, Forest Service, Pacific Northwest Research Station. 77 p.
- Román-Cuesta R.M., Gracia M., Retana J. 2009. Factors influencing the formation of unburned forest islands within the perimeter of a large forest fire // *Forest Ecology and Management*. Vol. 258(2). P. 71–80. DOI: 10.1016/j.foreco.2009.03.041
- Ryan K.C. 2002. Dynamic interactions between forest structure and fire behavior in boreal ecosystems // *Silva Fennica*. Vol. 36(1). P. 13–39. DOI: 10.14214/sf.548
- Ryu S.R., Chen J., Zheng D., Lacroix J.J. 2007. Relating surface fire spread to landscape structure: an application of FARSITE in a managed forest landscape // *Landscape and Urban Planning*. Vol. 83(4). P. 275–283. DOI: 10.1016/j.landurbplan.2007.05.002
- San-Miguel I., Anderson D.W., Coops N.C. 2017. Characterizing historical fire patterns as a guide for harvesting planning using landscape metrics derived from long term satellite imagery // *Forest Ecology and Management*. Vol. 399. P. 155–165. DOI: 10.1016/j.foreco.2017.05.021
- Swanson F.J. 1981. *Fire and geomorphic processes // Fire Regimes and Ecosystem Properties / H.A. Mooney, T.M. Bonnicksen, N.L. Christensen, J.E. Lotan, W.A. Reiniers (Eds.)*. Honolulu: USDA Forest Service. P. 401–420.
- Taylor S.W., Pike R.G., Alexander M.E. 1996. *Field Guide to the Canadian forest fire behavior prediction (FBP) system*. Special Report 11. Victoria, Canada: Natural Resources Canada, Canadian Forest Service. 60 p.
- Turner M.G., Romme W.H. 1994. Landscape dynamics in crown fire ecosystems // *Landscape Ecology*. Vol. 9(1). P. 59–77. DOI: 10.1007/BF00135079
- Agee J.K. 1996. The influence of forest structure on fire behavior. In: *Proceedings of the 17th annual forest vegetation management conference*. Redding, CA: University of California. P. 52–68.
- Agee J.K. 1998. The landscape ecology of western forest fire regimes. *Northwest Science* 72(17): 24–34.
- Agee J.K. 2002. The fallacy of passive management managing for firesafe forest reserves. *Conservation in Practice* 3(1): 18–26. DOI: 10.1111/j.1526-4629.2002.tb00023.x
- Artsybashev E.S. 2014. The impact of forest fires on silvan biogeocenoses. *Biosfera* 6(1): 53–59. [In Russian]
- Bartalev S.A., Stytsenko F.V., Egorov V.A., Loupian E.A. 2015. Satellite-based assessment of Russian forest fire mortality. *Russian Journal of Forest Science 2*: 83–94. [In Russian]
- Chafer C.J., Noonan M., Macnaught E. 2004. The post-fire measurement of fire severity and intensity in the Christmas 2001 Sydney wildfires. *International Journal of Wildland Fire* 13(2): 227–240. DOI: 10.1071/WF03041
- Furyaev V.V., Baranov N.M. 1972. About precision of accounting of quantity of soil fuels. In: N.P. Kurbatsky, E.V. Konev (Eds.): *Issues of Forest Pyrology*. Krasnoyarsk: Institute of Forest and Wood SB AS USSR. P. 164–170. [In Russian]
- Furyaev V.V., Chernykh V.A., Zlobina L.P. 2010. The role of regrowth in the formation of forest fuel complex and decrease in fire resistance of ribbon-like pine forests. *Russian Journal of Forest Science 3*: 15–20. [In Russian]
- Harris L., Taylor A.H. 2015. Topography, fuels, and fire exclusion drive fire severity of the Rim Fire in an old-growth mixed-conifer forest, Yosemite National Park, USA. *Ecosystems* 18(7): 1192–1208. DOI: 10.1007/s10021-015-9890-9
- Johnstone J.F., Rupp T.S., Olson M., Verbyla D. 2011. Modeling impacts of fire severity on successional trajectories and future fire behavior in Alaskan boreal forests. *Landscape Ecology* 26(4): 487–500. DOI: 10.1007/s10980-011-9574-6
- Kurbatsky N.P. 1964. Problem of Forest Fires. In: N.P. Kurbatsky (Ed.): *Emergency of Forest Fires*. Moscow: Nauka. P. 5–60. [In Russian]
- Kurbatsky N.P. 1972. Types of annealing and their application for localisation of forest fires. In: N.P. Kurbatsky, E.V. Konev (Eds.): *Issues of Wildfire Science*. Krasnoyarsk: Institute of Forest and Wood SB AS USSR. P. 171–231. [In Russian]
- Kushla J.D., Ripple W.J. 1997. The role of terrain in a fire mosaic of a temperate coniferous forest. *Forest Ecology and Management* 95(2): 97–107. DOI: 10.1016/S0378-1127(97)82929-5
- Lee S.W., Lee M.B., Lee Y.G., Won M.S., Kim J.J., Hong S.K. 2009. Relationship between landscape structure and burn severity at the landscape and class levels in Samchuck, South Korea. *Forest Ecology and Management* 258(7): 1594–1604. DOI: 10.1016/j.foreco.2009.07.017
- Matveeva T.A., Tsykalov A.G. 2010. The role of relief in formation of the stock of forest combustible materials. *Conifers of the Boreal Area* 27(3–4): 327–329. [In Russian]
- Melekhov I.S. 1947. *Nature of a Forest and Wildfires*. Arkhangel'sk: OGIZ. 60 p. [In Russian]
- Morrison P.H., Swanson F.J. 1990. *Fire history and pattern in a Cascade Range landscape*. Portland, USA: Department of Agriculture, Forest Service, Pacific Northwest Research Station. 77 p.
- Order of the Federal Forestry Agency dated 05.07.2011 №287 «On the approval of the classification of the natural fire hazard of forests and the classification of fire hazard in forests in relation to weather conditions». In: *Ros-*

References

- siyskaya Gazeta*. 2011. №186. Available from: <https://rg.ru/2011/08/24/pojari-dok.html>
- Osipov V.V. 2012. Annotated catalog of cyclostomes and fish in the Privolzhskaya Lesostep' State Nature Reserve. *Proceedings of the Mordovia State Nature Reserve* 10: 272–281. [In Russian]
- Román-Cuesta R.M., Gracia M., Retana J. 2009. Factors influencing the formation of unburned forest islands within the perimeter of a large forest fire. *Forest Ecology and Management* 258(2): 71–80. DOI: 10.1016/j.foreco.2009.03.041
- Ryan K.C. 2002. Dynamic interactions between forest structure and fire behavior in boreal ecosystems. *Silva Fennica* 36(1): 13–39. DOI: 10.14214/sf.548
- Ryu S.R., Chen J., Zheng D., Lacroix J.J. 2007. Relating surface fire spread to landscape structure: an application of FARSITE in a managed forest landscape. *Landscape and Urban Planning* 83(4): 275–283. DOI: 10.1016/j.landurbplan.2007.05.002
- San-Miguel I., Andison D.W., Coops N.C. 2017. Characterizing historical fire patterns as a guide for harvesting planning using landscape metrics derived from long term satellite imagery. *Forest Ecology and Management* 399: 155–165. DOI: 10.1016/j.foreco.2017.05.021
- Swanson F.J. 1981. Fire and geomorphic processes. In: H.A. Mooney, T.M. Bonnicksen, N.L. Christensen, J.E. Lotan, W.A. Reiners (Eds.): *Fire Regimes and Ecosystem Properties*. Honolulu: USDA Forest Service. P. 401–420.
- Taylor S.W., Pike R.G., Alexander M.E. 1996. *Field Guide to the Canadian forest fire behavior prediction (FBP) system*. Special Report 11. Victoria, Canada: Natural Resources Canada, Canadian Forest Service. 60 p.
- Turner M.G., Romme W.H. 1994. Landscape dynamics in crown fire ecosystems. *Landscape Ecology* 9(1): 59–77. DOI: 10.1007/BF00135079
- Zhuchkova V.K., Rakovskaya E.M. (Eds.). 2004. *Methods of holistic physical and geographical research*. Moscow: Academy. 368 p. [In Russian]

THE EFFECT OF LANDSCAPE PATTERN ON THE 2010 WILDFIRE SPREAD IN THE MORDOVIA STATE NATURE RESERVE, RUSSIA

Anastasia O. Kharitonova¹, Tatiana I. Kharitonova²

¹Center of Forest Ecology and Productivity of RAS, Russia

e-mail: charitonova-ao@yandex.ru

²Lomonosov Moscow State University, Russia

e-mail: kharito2010@gmail.com

This study was aimed to identify natural complexes, which, after the wildfire of 2010, served as natural barriers to the fire spread in the Mordovia State Nature Reserve (Russia), and to assess the role of landscape surroundings in reducing the fire severity. The paper investigates the properties, size and pattern of landscape complexes at the local scale in 200-m boundary zones where a fire stops or changes its severity. Three fire severity classes were associated with field and spectral diagnostic features. The high-severity class is detected on satellite images by a sharp reduction in phytomass from June to September in the year of the wildfire impact. Classes of medium and low severity fire are detected by a gradual decrease in phytomass within four years after the wildfire. In the Mordovia State Nature Reserve, the area affected by the fire is estimated at 151 km². Based on the landscape map of the Mordovia State Nature Reserve, the proportion of various types of landscape complexes was calculated within the border zones, adjacent to the front side: 1) to the general fire perimeter, 2) to the boundaries of the inner non-burned islands, 3) to the boundaries dividing a high-severity fire from a medium and low fire severity. We found that the occurrence of hydromorphic complexes is 1.5–10.0 times higher on the side of the considered boundaries where the fire energy decreases. Within the fire perimeter, hydromorphic complexes either become hotbeds of high fire severity due to the high amount of available fuel, or form islands of unburned forest. The success of hydromorphic complexes in stopping or slowing a fire depends more on their size than on the level of wetness. The width of swampy and damp river channels was measured along the entire length with a 1-km interval. Diameter measurements were made for swampy depressions. We found that narrow swampy river channels of 150–160-m wide do not present a fire barrier and completely burn out in a high-severity fire. River segments, where the channel width increases up to 170–180 m, present a barrier for a low-severity fire, but do not slow down the spread of medium or high-severity fire. River valleys of 200–250-m width mostly do not burn, but also do not present a barrier because a high-severity fire jumps to other sides of the valley and spreads further. A low-severity fire dies down, and a stronger fire subsides when it meets a river channel 250–300 m wide. River valleys, over 700 m wide, act as a barrier to any wildfire type. Swampy depressions do not act as fire breaks, but their clusters increase landscape heterogeneity and slow down the fire. The average diameter of mires in the perimeter of a high fire severity is 32 m; their area proportion is 0.07%. The diameter of mires in the perimeter of medium and low fire severity increases on average up to 63–77 m. And their area proportion increases up to 0.40–0.59%.

Key words: fire severity, Landsat 5, Landsat 8, landscape metrics, remote sensing, wildfire border zone