

Оценка подверженности бореальных лесов Урала воздействию лесных пожаров и ветровалов по многолетним рядам спутниковых наблюдений

А.Н. Шихов, С.И. Перминов, Е.С. Киселева

Пермский государственный национальный исследовательский университет

Пермь, 614990, Россия

E-mail: and3131@inbox.ru

Лесные пожары и ветровалы являются важнейшими естественными факторами нарушений в бореальных лесах России, ущерб от которых может увеличиться в связи с изменением климата. В настоящей статье представлена оценка площадей бореальных лесов, погибших вследствие лесных пожаров и ветровалов в Уральском регионе за период с 2000 по 2014 г., полученная на основе результатов проекта Global Forest Change (Hansen et al., 2013) и других открытых источников данных космической съемки. Общая площадь лесов, погибших вследствие лесных пожаров и ветровалов на Урале за период с 2000 по 2014 г., составила 1,638 млн га, или 1,56% от лесопокрытой площади по состоянию на 2000 г. Доля пожаров и ветровалов в структуре нарушений лесного покрова составляет 96,4 и 3,6% соответственно. Максимальная частота возникновения крупных пожаров наблюдается в Северном Зауралье между 64° и 65° с.ш., 63° и 68° в.д., где доля погибших от пожаров лесов превышает 10% лесопокрытой территории. Доля ветровалов в структуре потерь лесных ресурсов значительна только в Предуралье.

Число крупных пожаров и ветровалов, а также их площадь характеризуется сильной межгодовой изменчивостью, в связи с чем за 15-летний период сложно выявить выраженный тренд. Для этого необходимо расширение исследуемого периода. Помимо оценки межгодовой и внутригодовой изменчивости, в статье также приведены сведения о массовых вспышках природных пожаров и крупнейших ветровалах в Уральском регионе за период с 2000 по 2014 г.

Ключевые слова: нарушения лесного покрова, лесные пожары, ветровалы, снимки LANDSAT, Global Forest Change Map, Уральский регион

Одобрена к печати: 25.05.2017

DOI: 10.21046/2070-7401-2017-14-4-87-102

Введение

Лесные пожары и ветровалы являются важнейшими естественными факторами нарушений в бореальных лесах России. В период с 2002 по 2011 г. около 65,5% всей площади нарушений лесного покрова в России было обусловлено лесными пожарами (Krylov et al., 2014). Более 90% площади лесных пожаров приходится на Азиатскую часть России. На Европейской территории доля лесных пожаров в структуре нарушений лесного покрова значительно меньше, чем в Сибири, и составляет 8,1%, а доля ветровалов равна 1,6% (Potapov et al., 2015). При этом в ряде регионов (на северо-западе Европейской России, в Костромской области и на Западном Урале) доля ветровалов в структуре нарушений лесного покрова сопоставима с долей лесных пожаров или даже превышает ее (Крылов, Малахова, Владимирова, 2012; Петухов, Немчинова, 2014; Шихов, 2014).

Вклад лесных пожаров и ветровалов в общие потери лесных ресурсов в Европейской части России в последние годы имел тенденцию к увеличению — от 1,5% в 1986–1988 гг. до 11,3% в 2007–2012 гг. (Potapov et al., 2015). Данный тренд может быть обусловлен ростом повторяемости экстремальных метеорологических явлений — засух и шквалистых ветров (Potapov et al., 2015; Schelhaas, Nabuurs, Schuck, 2003). При реализации ожидаемых

сценариев глобального потепления вероятно дальнейшее увеличение масштаба ущерба лесных ресурсов. Так, рост природной пожароопасности может быть обусловлен увеличением продолжительности пожароопасного периода и повторяемости блокирующих антициклонов, вызывающих сильные засухи (Елисеев, Мохов, Чернокульский, 2014). Увеличение масштабов ветровальных нарушений лесного покрова может быть связано с ростом частоты и интенсивности конвективных явлений на фоне повышения среднегодовой температуры воздуха (Diffenbaugh, Scherer, Trapp, 2013; Lassig, Močalov, 2000; Schlyter et al., 2006).

Уральский регион не является исключением в этом отношении, поскольку бореальные леса, покрывающие более 45% его территории, постоянно подвержены воздействию пожаров и ветровалов. Разнообразие климатических условий и породного состава лесов Урала обуславливает различную повторяемость этих явлений в пределах территории региона, а также некоторые особенности их сезонной динамики. Особенности пространственно-временного распределения ветровалов на Урале за период с 1946 по 1996 г. изучены в работах (Мочалов, 2002; Lassig, Močalov, 2000). Авторы подчеркивали, что во второй половине XX в. масштабы и последствия ветровалов на Урале неоднократно приобретали катастрофический характер. Так, в 1975 г. на западном макросклоне Урала (север Пермской области) ураганом был повален лес на площади 260 тыс. га (Мочалов, 2002). В Свердловской области за период с 1965 по 1995 г. от ветровала в той или иной мере пострадали насаждения в 46 лесхозах из 51, т.е. практически на всей территории области. Особенно сильный ущерб лесам области был нанесен в июне 1995 г., когда в результате воздействия штормового ветра в сочетании с мокрым снегом ветровал охватил площадь более 350 тыс. га, в том числе большую часть Висимского заповедника (Алексенков и др., 1998; Мочалов, 2002).

В последние годы важнейшим источником данных для изучения нарушений лесного покрова является космический мониторинг. Появление в открытом доступе многолетних рядов данных сначала со спутников Terra/Aqua, а затем Landsat и Sentinel-2 обеспечило новые возможности получения объективной оценки подверженности бореальных лесов воздействию пожаров и ветровалов. В Институте космических исследований РАН на основе спутниковых данных низкого разрешения были разработаны технологии оценки выгоревших площадей, а также степени повреждения лесов пожарами (Стыценко и др., 2013; Loupian et al., 2006). С 2004 г. на территории России действует информационная система дистанционного мониторинга лесных пожаров ИСДМ-Рослесхоз (Барталев и др., 2008), а с 2012 г. — информационная система космического мониторинга санитарного состояния лесов ВЕГА-Лесопатолог (Уваров и др., 2012). Специалистами ФГУ «Рослесозащита» на основе данных Landsat была создана карта крупных ветровалов в России за 2009–2010 гг. (Крылов, Малахова, Владимирова, 2012). В 2013–2015 гг. в открытом доступе были опубликованы тематические продукты обработки данных Landsat – Global Forest Change Map (Hansen et al., 2013) и Eastern'Europe Forest Cover Change (Potapov et al., 2015).

В результате появились новые возможности анализа многолетних данных о нарушениях лесного покрова на обширных территориях с высокой детальностью и оценки подверженности бореальных лесов воздействию этих явлений. Одна из первых работ, в которой в качестве исходной информации были использованы данные проекта Global Forest Change, посвящена анализу пространственно-временного распределения лесных пожаров в России в 2002–2011 гг. (Krylov et al., 2014). В работе (Potapov et al., 2015) впервые была дана оценка вклада лесных пожаров и ветровалов в структуру нарушений лесного покрова в Восточной Европе за 1985–2012 гг.

Целью настоящего исследования является оценка площадей бореальных лесов, погибших вследствие лесных пожаров и ветровалов на территории Урала за период с 2000 по 2014 г., анализ их пространственно-временного распределения, а также изучение основных факторов, определяющих подверженность лесов воздействию пожаров и ветровалов. Исследуемая территория включает собственно Урал, а также Предуралье и Зауралье. Она ограничена меридианами 50° и 70° в.д. и государственной границей РФ.

Исходные данные и методы исследования

В качестве источников информации для создания базы данных нарушений лесного покрова, вызванных лесными пожарами и ветровалами на Урале, были использованы:

– Опубликованные в свободном доступе результаты проекта Global Forest Change (GFC) — данные о ежегодных изменениях лесного покрова Земли на основе многолетнего ряда спутниковых снимков Landsat за период с 2000 по 2014 г., с пространственным разрешением 30 м (Hansen et al., 2013). В проекте GFC (<http://earthenginepartners.appspot.com/google.com/gMG7KbLG>) были получены данные о лесопокрытой площади по состоянию на 2000 и 2014 гг., участках нарушений лесного покрова (forest loss) и лесовосстановления (forest gain). Данные GFC о нарушениях лесного покрова, классифицированные по годам (Forest Loss Year), предоставляются в формате GeoTIFF в разграфке 10×10°. Дата появления нарушений лесного покрова определена с точностью до года.

– Данные о тепловых аномалиях, детектированных датчиками MODIS, установленными на спутниках Terra и Aqua (MODIS Active Fire Data), полученные с сервиса FIRMS (earthdata.nasa.gov/data/near-real-time-data/firms), за 2001–2014 гг.

– Карта лесов России (преобладающие породы и полнота насаждений) в масштабе 1:14 000 000, созданная в рамках проекта TerraNorte (Bartalev et al., 2004).

– Исходные снимки Landsat TM, ETM+ и OLI, полученные с веб-сервисов Геологической службы США (<https://earthexplorer.usgs.gov/>).

– Снимки сверхвысокого разрешения с открытых картографических сервисов Google.Maps, Yandex.Maps, Bing Maps, ESRI Imagery.

Идентификация нарушений лесного покрова, связанных с лесными пожарами и ветровалами, выполнялась по исходным данным GFC (Forest Loss Year), полученным в виде

растров с размером ячейки, равным 1", в среде ArcGis 10.*. Для частичной автоматизации данной процедуры был разработан скрипт на языке Python. С его помощью осуществляется выбор ячеек растра Forest Loss Year, соответствующих нарушениям лесного покрова в пределах заданной пользователем области, растрово-векторное преобразование и заполнение полей атрибутивной таблицы: тип нарушения (гарь или ветровал), дата начала и дата окончания (для пожаров). Таким образом, в настоящей работе рассматриваются только те участки гарей и ветровалов, в пределах которых произошла гибель насаждений (stand-replacement forest disturbance). Согласно работе (Krylov et al., 2014), в пределах лесной зоны Приполярного, Северного и Среднего Урала большая часть лесных пожаров вызывает гибель лесов, на Южном Урале и в Зауралье преобладают весенние пожары, не вызывающие полной гибели насаждений. Что же касается ветровалов, то в настоящей работе рассматривались только сплошные ветровалы, которые надежно идентифицировались по данным GFC и по снимкам сверхвысокого разрешения.

Создание слоя гарей

Нарушения лесного покрова, связанные с пожарами, были выявлены путем пересечения данных Forest Loss Year с тепловыми аномалиями (термоточками) по данным MODIS. Участки нарушений лесного покрова, в пределах которых имеются группы термоточек, выявленных по данным MODIS за текущий или предшествующий появлению нарушения год, были идентифицированы как гарь. Тепловые аномалии за предшествующий год учитывались, поскольку точность определения года нарушения по данным GFC сравнительно невысока. Для 24,8% пикселей год нарушения определен с ошибкой ± 1 год, а для 3,3% пикселей ошибка составляет ± 2 года, что обусловлено отсутствием безоблачных снимков (Hansen et al., 2013). Например, гарь от многих пожаров, произошедших в августе 2010 г., по данным GFC идентифицируются как появившиеся в 2011 г.

В пределах одной гарь часто присутствуют пиксели, для которых в данных GFC определены разные годы (например, для гарей от пожаров 2010 г. в данных GFC указаны 2010, 2011 и 2012 гг.). Это обусловлено постепенным усыханием древостоев после пожара, продолжительность которого обычно составляет 1–3 года (Krylov et al., 2014). Поэтому при выделении гарей учитывались пиксели с нарушениями как за год наблюдения пожара (по данным MODIS), так и за два последующих года. Дата начала и окончания действия пожара определялась по данным MODIS (Active Fire Data), а месяц определялся по дате начала действия пожара.

Как известно, многие пожары (в том числе достаточно крупные) не фиксируются датчиками MODIS по причине влияния облачности или сравнительно малой интенсивности горения (Krylov et al., 2014). Однако гарь от этих пожаров также могут быть выявлены по данным Global Forest Change на основе характерных геометрических признаков и верифицированы по архивным спутниковым снимкам Landsat. Гарь от таких пожаров были

выделены по данным Global Forest Change без указания дат начала и окончания действия пожаров. Общая их площадь составила 13,9 тыс. га, что составляет менее 1% от площади всех выделенных гарей, а площадь самой крупной гари — 793 га.

В базу данных были включены также пожары 2000 г., несмотря на то, что за этот год отсутствуют данные MODIS о тепловых аномалиях. Однако большая часть нарушений лесного покрова от пожаров 2000 г. уже имеется в данных GFC (они закодированы как нарушения 2001 г.). Пожароопасный сезон 2000 г. был экстремальным на севере и северо-западе изучаемой территории, общая площадь пожаров составила более 327 тыс. га, в связи с чем включение пожаров 2000 г. в базу данных было признано целесообразным. Гари от пожаров, действовавших в июле 2000 г., были выделены на основе данных GFC или оцифрованы вручную по снимкам Landsat-7 ETM+ за 2000–2001 гг.

Точность оценки площади лесов, погибших от пожаров, определяется пространственным разрешением снимков Landsat (30 м) и точностью данных Global Forest Change. Результаты валидации данных GFC для различных биомов (в том числе для бореальных лесов) представлены в работе (Hansen et al., 2013, Supplementary materials). Общая точность классификации нарушений лесного покрова по данным GFC в бореальной зоне составляет 99,3%, точность производителя — 93,9%, точность пользователя — 88,0%. При оценке нарушений, вызванных пожарами, доля пропусков объектов (ошибка оmissии) может быть несколько больше среднего значения для всех видов нарушений (равного 6,1%). Например, в работе (Krylov et al., 2014) отмечено, что при оценке площади гарей по данным GFC ошибка оmissии превышала ошибку комиссии приблизительно в пять раз и составила 1,1% от общей площади гарей. Более значительная недооценка может иметь место в 2000 г. вследствие отсутствия данных о тепловых аномалиях, полученных с датчиков MODIS.

Создание слоя ветровалов

Выявление ветровалов по данным GFC производилось на основе их характерных геометрических признаков, к которым относятся большая протяженность вдоль направления ветра, а также линейный или веерный характер повреждения лесного покрова (Петухов, 2016). Для каждого случая ветровала выполнялась верификация по высокодетальным спутниковым снимкам, полученным с открытых картографических сервисов. Это позволило также определить тип метеорологического явления (шквал или смерч), вызвавшего ветровал. Важнейшей особенностью смерчевых ветровалов является вихревой характер повала деревьев (при этом хорошо прослеживается вращение, как правило, против часовой стрелки). На ветровалах, вызванных шквалами, вектор вывала деревьев совпадает с направлением ветра при шквале. Также ветровалы, вызванные смерчами, характеризуются значительным превышением протяженности над шириной (как правило, более чем в 10 раз) и сплошным характером повреждения древостоя. Более подробно методика их идентификации рассмотрена в работе (Шихов, Тарасов, 2016).

Уточнение даты появления ветровала выполнялось на основе всех доступных снимков со спутников серии Landsat. С учетом влияния облачности, это позволяло определить диапазон дат с точностью от одной недели до нескольких месяцев. В качестве дополнительного источника сведений для уточнения дат шквалов или смерчей привлекались данные метеостанций, ближайших к месту обнаружения ветровала и сведения о случаях шквального ветра/смерчей, опубликованные в СМИ. Это позволило уточнить даты нескольких случаев ветровалов. При анализе дат ветровалов возникает также вопрос об объединении или разделении участков нарушений исходя из их локализации, направления и пространственной формы (Петухов, 2016). Относительно близко расположенные ветровалы со сходным направлением и пространственной структурой повреждения лесного покрова в ряде случаев были объединены.

Точность оценки площади лесов, погибших от ветровалов, также определяется пространственным разрешением снимков Landsat и точностью данных Global Forest Change. В работе (Королева, Ершов, 2012) на основе сравнения со снимками сверхвысокого разрешения показано, что оценка площади каждого участка ветровала с ошибкой менее 15% по данным Landsat возможна, если его площадь превышает 2,6 га. При малых значениях площади происходит ее систематическое завышение. В полученном наборе данных около 74% от общей площади ветровалов, выделенных по данным GFC, приходится на участки с площадью $\geq 2,6$ га. Можно предположить, что для них площадь по данным GFC оценена корректно, что подтверждают также результаты сравнительного анализа, представленные в работе (Шихов, Тарасов, 2016). Для остальных 26% вероятно некоторое систематическое завышение площадей. Важно отметить также, что несплошные ветровалы по данным GFC, как правило, не выделяются.

Результаты и их обсуждение

Созданная база геоданных содержит сведения о 2277 нарушениях лесного покрова на территории Урала, в том числе 2080 гарей (на общей площади 1,579 млн га), 92 ветровалов, вызванных шквалами (на общей площади 49,1 тыс. га) и 105 смерчевых ветровалов (на общей площади 10,8 тыс. га). В настоящей работе рассматривались только гари от крупных пожаров площадью более 25 га (в соответствии с классификацией Рослесхоза для районов интенсивного ведения лесного хозяйства). Площадной ценз для ветровалов, вызванных шквалами, был принят равным 10 га.

Особенности пространственного распределения пожаров и ветровалов

Общая площадь лесных насаждений, погибших вследствие лесных пожаров и ветровалов в регионе за период с 2000 по 2014 г., составила 1,638 млн га, или 1,56% всей

лесопокрытой площади региона по состоянию на 2000 г. Доля пожаров и ветровалов в структуре нарушений лесного покрова составляет 96,4 и 3,6% соответственно. Область с максимальной долей погибших насаждений (10–14% от всей лесопокрытой площади), которая расположена вблизи границы Ханты-Мансийского и Ямало-Ненецкого АО, между 64° и 65° с.ш., 63° и 68° в.д., соответствует области максимальной частоты возникновения крупных лесных пожаров (рис. 1). Это же относится и к вторичным максимумам, основной из которых расположен на севере Свердловской области.

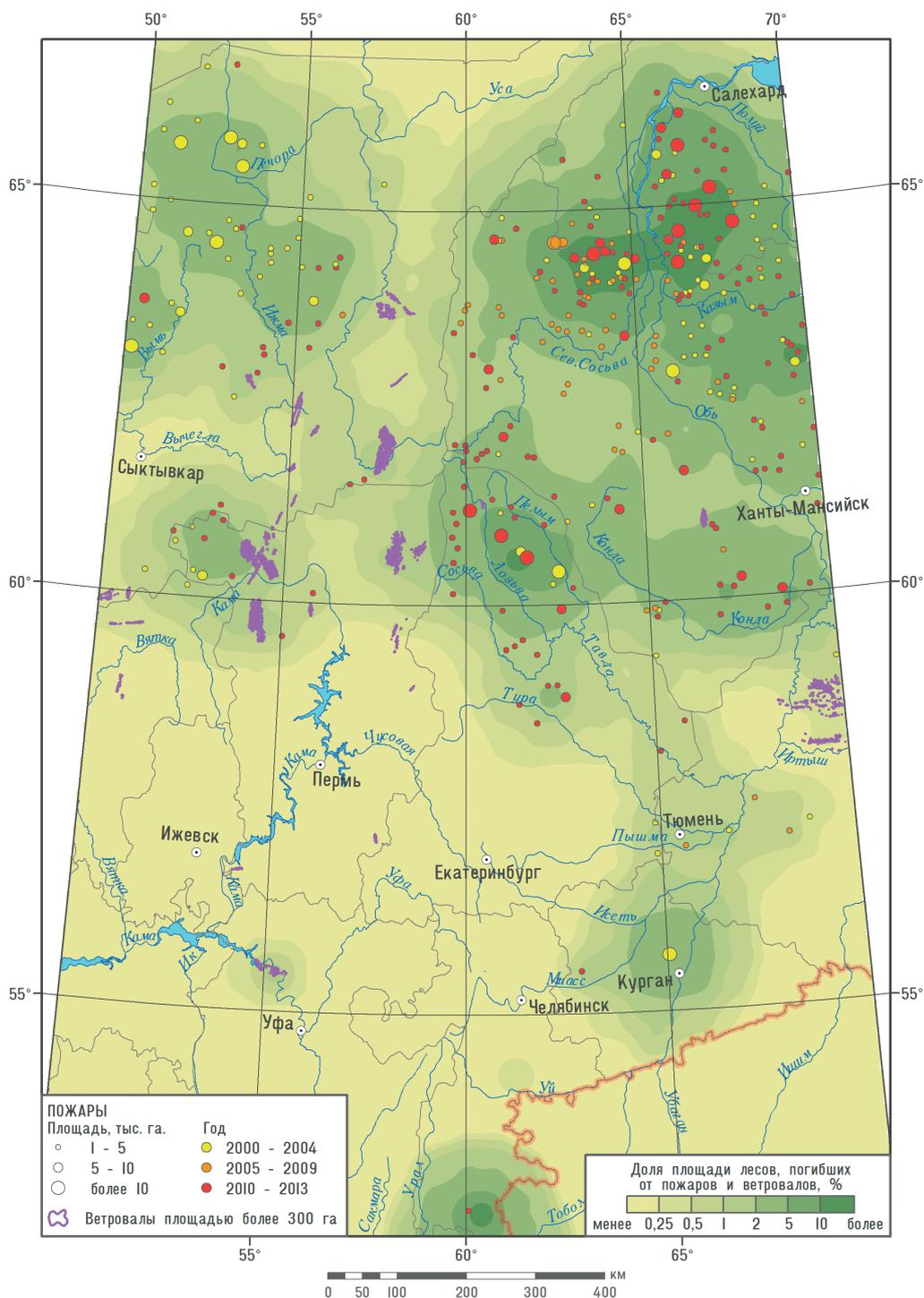


Рис. 1. Подверженность лесов Урала воздействию лесных пожаров и ветровалов за 2000–2014 гг.

Лишь на северо-западе Пермского края, где площадь погибших насаждений также составляет более 2% лесопокрытой территории, вклад ветровалов в структуру потерь является существенным. Минимальная повторяемость пожаров и ветровалов характерна для лесов Южного и Среднего Урала, а также Удмуртии и южной части Пермского края, где доля погибших насаждений составляет 0,001–0,1% от лесопокрытой площади.

Важнейшими факторами, определяющими природную пожароопасность лесов, являются их преобладающий породный состав, а также годовое количество осадков, которое в Зауралье значительно меньше, чем в Предуралье. Максимальной пожароопасностью характеризуются сосновые и особенно лиственничные леса (Krylov et al., 2014), которые распространены преимущественно в Зауралье (Bartalev et al., 2004). В Предуралье крупнейший массив сосновых лесов расположен на крайнем северо-западе Пермского края и в прилегающем районе Кировской области. Он также отличается высокой пожароопасностью. Крупные пожары наблюдались в данном районе в 2000, 2001 и 2010 гг. (Шихов, 2014). Вдоль западного склона Северного Урала, где расположен крупнейший массив темнохвойных лесов, природная пожароопасность значительно меньше, и доля площади погибших лесов составляет здесь 0,5% и менее. В целом по изучаемой территории крупные пожары чаще всего возникают в сосновых лесах, однако доля пожаров в темнохвойных лесах также значительна (рис. 2а). Более 60% всех пожаров в темнохвойных лесах произошло в Республике Коми в июле 2000 г.

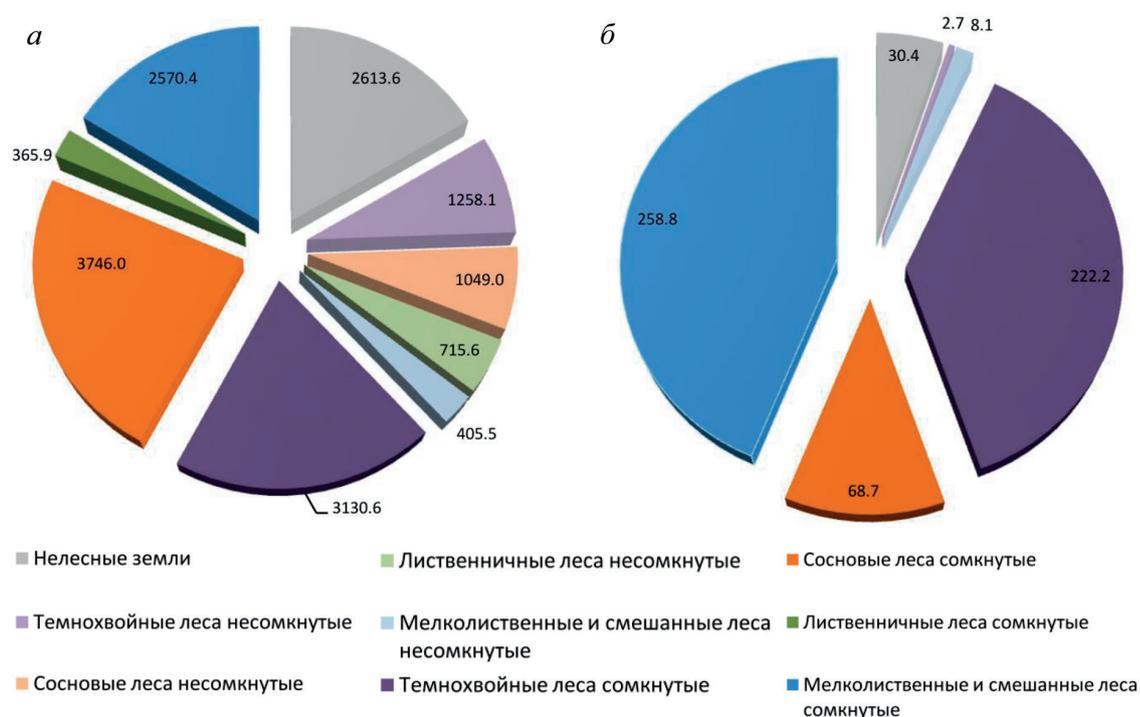


Рис. 2. Распределение площади лесов (км²), погибших от пожаров (а) и ветровалов (б), по преобладающим породам на основе карты лесов России (Bartalev et al., 2004)

Распределение по породному составу лесов, пострадавших от ветровалов, является совершенно иным (рис. 2б). Более 42% ветровалов произошло в смешанных лесах, которые

наиболее широко распространены на территории Пермского края и Кировской области, и еще около 37% — в темных хвойных лесах (Bartalev et al., 2004). Наиболее подвержены ветровалам сравнительно небольшие участки спелых и перестойных темных хвойных лесов, сохранившиеся в районах активных лесозаготовок. В основном именно они пострадали от катастрофического ветровала, произошедшего 18.07.2012 на территории Пермского края, его площадь составила около 26 тыс. га.

Годовой ход повторяемости пожаров и ветровалов

В годовом ходе число крупных лесных пожаров и ветровалов (которые наносят основной ущерб для лесного фонда) подвержено резким колебаниям. За 15-летний период невозможно выявить наличие статистически значимого тренда. Годовой ход лесных пожаров характеризуется выраженной циклическостью (рис. 3а). Так, в целом по территории Урала в 2006–2009 гг. наблюдалась низкая природная пожароопасность на фоне избытка осадков в летний период. Затем последовали четыре года с высокой пожароопасностью. Они отличались дефицитом осадков и высокой температурой воздуха в теплый сезон. Особенно сильные засухи наблюдались в 2010 и 2013 гг. В 2014–2015 гг. количество пожаров вновь резко сократилось в связи с избытком осадков в летний период.

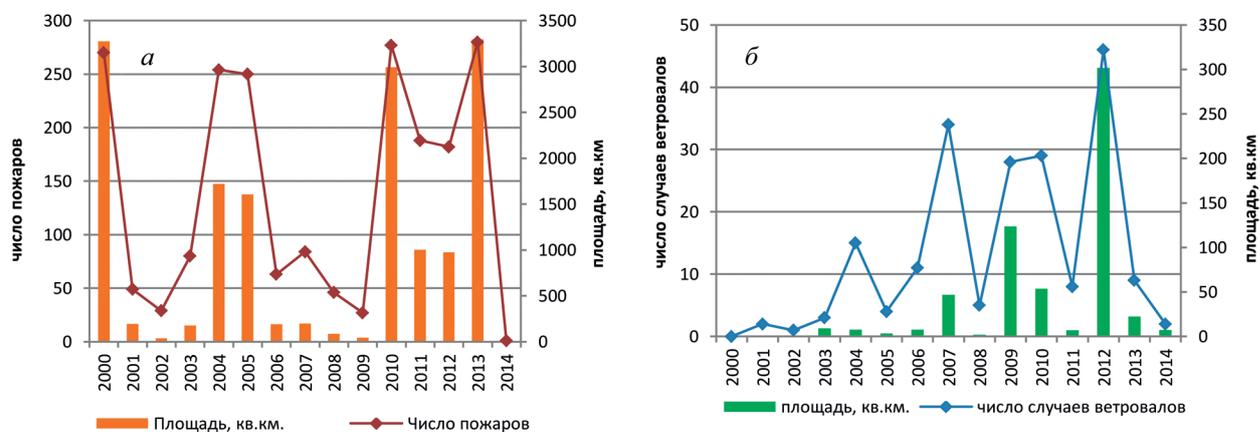


Рис. 3. Годовой ход числа лесных пожаров и пройденной ими площади (а), числа ветровалов и пройденной ими площади (б)

Однако в силу обширности рассматриваемой территории данные циклы в разных районах проявляются по-разному. Так, из трех лет с наибольшим числом пожаров (2000, 2010 и 2013 гг.) ни в одном случае чрезвычайная пожароопасность не наблюдалась одновременно на всей территории Урала. В целом за период 2000–2014 гг. в регионе наблюдалось шесть массовых вспышек природных пожаров, краткие сведения о которых приведены в табл. 1. На наиболее пожароопасной территории (северо-запад Ханты-Мансийского АО) массовые вспышки природных пожаров наблюдались четыре раза.

Годовой ход числа ветровалов и их площадь определяются отдельными экстремальными событиями (шквалами или смерчами большой разрушительной силы). Максимумы числа случаев ветровалов и их площадь зафиксированы в 2007, 2009, 2010 и 2012 гг. Они обусловлены штормовыми событиями, которые перечислены в *табл. 2*. В период 2000–2006 гг. ни одного столь крупного ветровала на рассматриваемой территории не было, что указывает на положительный тренд их повторяемости.

Таблица 1. Основные случаи массовых вспышек лесных пожаров на Урале в 2000–2014 гг.

<i>Дата (период)</i>	<i>Регион</i>	<i>Число гарей* и их общая площадь, тыс. га</i>	<i>Краткие сведения о метеоусловиях</i>
15.07.2000–30.07.2000	Центр и северо-запад Республики Коми, север Ханты-Мансийского и юго-запад Ямало-Ненецкого АО	270 (327)	10–25 июля период жаркой сухой погоды (в дневные часы +29...+34 °С) под влиянием долгоживущего блокирующего антициклона над Уралом
11.05.2004–18.05.2004	Курганская область, юго-запад Тюменской области	29 (37,5)	14–17 мая аномально жаркая погода (в дневные часы до +36 °С) с ветром до 20 м/с
01.07.2004–08.08.2004	Северо-восток Свердловской области, запад Ханты-Мансийского АО	160 (121)	1 июля – 8 августа период жаркой сухой погоды (в дневные часы +25...+35 °С) под влиянием долгоживущего блокирующего антициклона над Северным Уралом
23.07.2005–10.08.2005	Северо-запад Ханты-Мансийского АО	220 (154)	23–30 июля период жаркой сухой погоды (в дневные часы +30...+33 °С) под влиянием долгоживущего блокирующего антициклона над Зауральем
24.07.2010–23.08.2010	Север Свердловской области и Пермского края	270 (299)	Продолжительная засуха в период 20 июня – 23 августа с повышением температуры до +30...+37 °С, под влиянием периферии долгоживущего блокирующего антициклона
20.07.2013–10.08.2013	Северо-запад Ханты-Мансийского АО, юго-запад Ямало-Ненецкого АО	150 (284)	18 июля – 10 августа продолжительный период аномально жаркой погоды (в дневные часы до +34 °С) под влиянием долгоживущего антициклона над Ямалом

* Гари с площадью ≥ 25 га

На *рис. 4* представлена межгодовая изменчивость площади пожаров и ветровалов (в % от лесопокрытой территории) в ячейках сетки размером 4° по широте и 10° по долготу. Границы секторов соответствуют 52°, 56°, 60°, 64° и 68° с.ш., 50°, 60° и 70° в.д. Сетка построена именно таким образом, поскольку меридиан 60° примерно соответствует осевым хребтам Урала, а широтное деление отражает границы Южного, Среднего, Северного и Приполярного Урала. В основном межгодовая изменчивость площади нарушений лесного покрова определяется лесными пожарами. Выделяются 2000, 2004, 2005, 2010 и 2013 гг., когда наблюдались массовые вспышки лесных пожаров. Лишь в секторе 56–60° с.ш., 50–60° в.д. максимум площади погибших лесов приходится на 2012 г., что связано

с катастрофическим ветровалом 18.07.2012. В юго-западном секторе существенные нарушения лесного покрова от пожаров и ветровалов в большинстве лет вообще не зафиксированы. Максимум приходится на 2007 г., когда произошел крупный ветровал в районе Бирска.

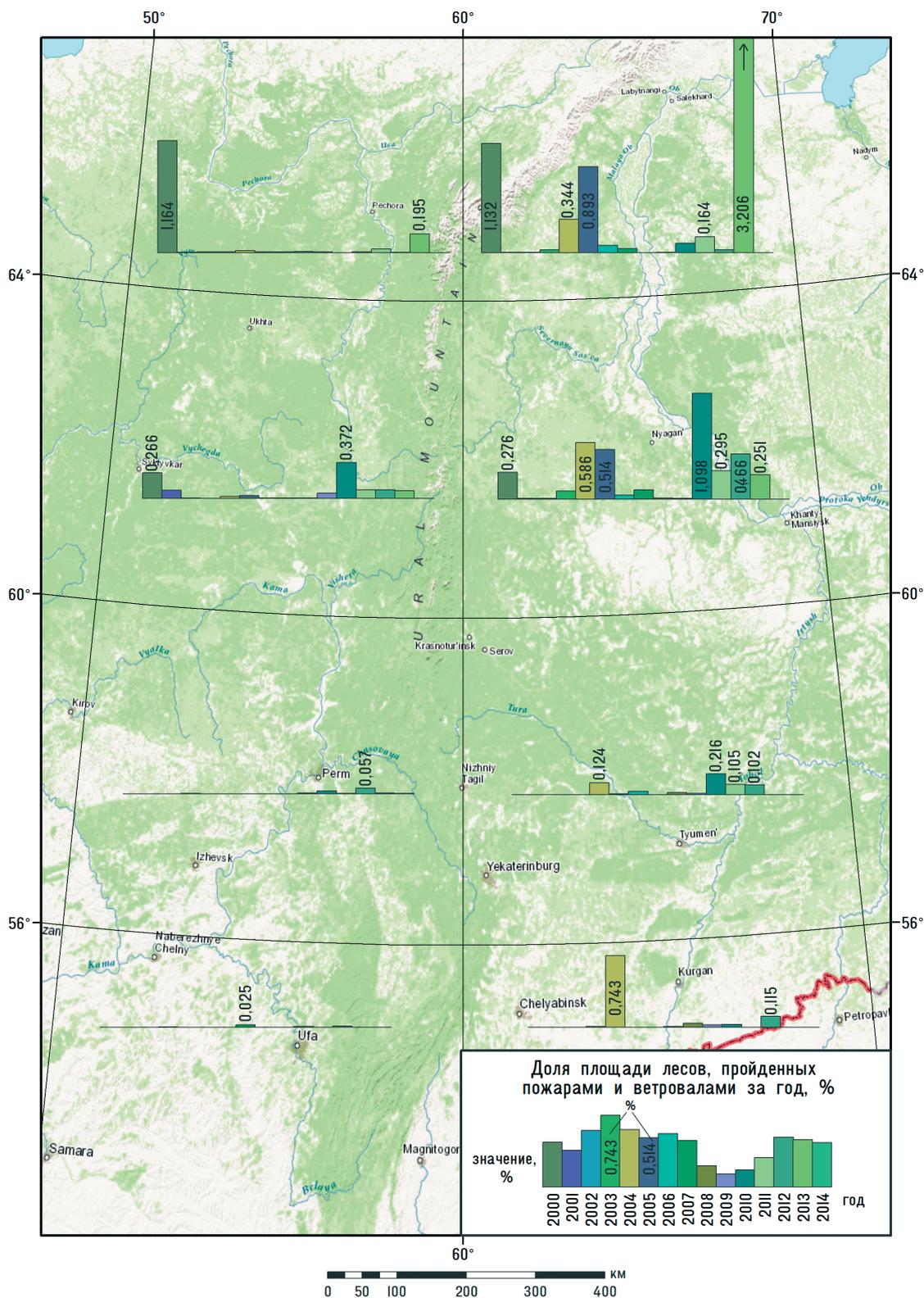


Рис. 4. Временная динамика потерь лесных ресурсов от пожаров и ветровалов на Урале в 2000–2014 гг. в ячейках $4 \times 10^\circ$

Таблица 2. Наиболее значимые штормовые события, вызвавшие массовые ветровалы на Урале в 2000–2014 гг.

Дата	Регион	Площадь ветровала, га	Краткое описание события
01.01.2007	Бирский, Дюртюлинский районы Башкортостана	2329	Шквал (≥ 30 м/с) во второй половине дня 01.06.2007 г.
23.06.2007	Север Свердловской области, юго-запад Ханты-Мансийского АО	1420	Серия смерчей (более 10 случаев)
07.06.2009	Север Пермского края, юго-восток Республики Коми	10 600	Серия смерчей (9 случаев) и разрушительный шквал в Троицко-Печорском районе
07.06.2010	Тюменская область (Уватский, Вагайский районы)	Свыше 2500	Шквал (≥ 25 м/с)
11.08.2010	Республика Коми, район Вуктыл	1840	Шквал (скорость ветра не определена)
18.07.2012	Север Пермского края, Белохолуницкий район Кировской области	26 650	Три шквала (скорость ветра ≥ 27 м/с)
17.06.2013	Нагорский район Кировской области	1465	Смерч

Распределение лесных пожаров и ветровалов по месяцам года представлено на рис. 5. Пожароопасность лесов почти по всей рассматриваемой территории имеет максимум во второй половине июля – начале августа, когда и происходит большинство крупных пожаров. В июне пожаров значительно меньше, а в мае крупные пожары наблюдались только в 2004 и 2011 гг. Большинство ветровалов, наоборот, происходит в июне, что соответствует сезонному максимуму повторяемости шквалов и смерчей. Исключением стал лишь катастрофический ветровал 18.07.2012, в результате чего максимум площади ветровалов оказался смещен на июль. При этом по 70 случаям ветровалов дата с точностью до месяца не определена.

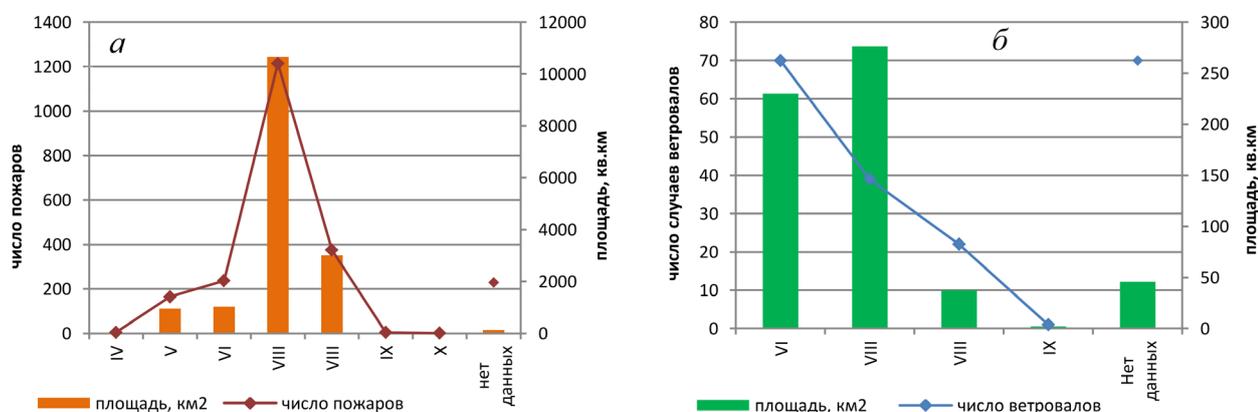


Рис. 5. Внутригодовое распределение числа лесных пожаров и пройденной ими площади (а), числа ветровалов и пройденной ими площади (б)

Заключение

В результате проведенного исследования создана база данных о лесных пожарах и ветровалах на территории Урала, Предуралья и Зауралья за период с 2000 по 2014 г. Общая площадь лесов, погибших в результате пожаров и ветровалов в регионе, составляет 1,637 млн га, или 1,56% от всей лесопокрытой территории. Из них 96,4% приходится на пожары, а доля ветровалов составляет 3,6%. Максимальная частота возникновения крупных пожаров наблюдается в Северном Зауралье между 64° и 65° с.ш., 63° и 68° в.д., где доля погибших от пожаров лесов составляет более 10% лесопокрытой территории. Доля ветровалов в структуре потерь лесного фонда значительна только в Предуралье. Подверженность территории воздействию пожаров и ветровалов определяется, главным образом, климатическими особенностями и преобладающим породным составом лесов. Максимальной пожароопасностью характеризуются сосновые леса Северного Зауралья, а максимальная подверженность ветровалам характерна для участков сохранившихся спелых и перестойных темнохвойных лесов в районах активных лесозаготовок. Влияние других факторов (как природных, так и социально-экономических) на подверженность лесов воздействию пожаров и ветровалов требует дополнительного изучения.

Число пожаров и ветровалов, а также их площадь характеризуется сильной межгодовой изменчивостью, в связи с этим за 15-летний период сложно выявить выраженный тренд. За этот период в регионе произошло шесть массовых вспышек природных пожаров (в 2000, 2004, 2005, 2010 и 2013 гг.). Из них наиболее катастрофический характер имели вспышки пожаров в 2000, 2010 и 2013 гг. В свою очередь, наиболее крупные ветровалы (площадью более 1000 га) произошли в 2007, 2009, 2010 и 2012 гг. Предварительно можно заключить, что повторяемость ветровалов имеет тенденцию к росту. Однако для более объективной оценки многолетнего тренда и его возможной связи с климатическими изменениями необходимо расширение исследуемого периода.

Исследование проведено при финансовой поддержке гранта Президента РФ № МК-801.2017-5 и РФФИ (проект № 16-05-00245-а).

Литература

1. Алесенков Ю.М., Поздеев Е.Г., Шлыкова Н.А., Теринов Н.Н., Иванина Н.А. О последствиях ветровала 1995 г. в Висимском госзаповеднике // Леса Урала и хозяйство в них / Министерство общ. и проф. образования РФ, Урал. гос. лесотехн. академия, Швейцар. федер. НИИ леса, снега и ландшафта. Екатеринбург, 1998. Вып. 20. С. 272–278.
2. Барталев С.А., Ершов Д.В., Коровин Г.Н., Котельников Р.В., Лупян Е.А., Щепинский В.Е. Информационная система дистанционного мониторинга лесных пожаров (состояние и перспективы развития) // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2008. Т. 5. № 2. С. 419–429.
3. Елисеев А.В., Мохов И.И., Чернокульский А.В. Влияние низовых и торфяных пожаров на эмиссии CO₂ в атмосферу // Доклады Академии наук. 2014. Т. 459. № 4. С. 496–500.
4. Королева Н.В., Ершов Д.В. Оценка погрешности определения площадей ветровалов по космическим изображениям высокого пространственного разрешения LANDSAT-TM // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2012. Т. 9. № 1. С. 80–86.
5. Крылов А.М., Малахова Е.Г., Владимировна Н.А. Выявление и оценка площадей катастрофических ветровалов 2009–2010 гг. по данным космической съемки // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2012. № 200. С. 197–207.

6. Мочалов С.А. Глобальное изменение климата и проблемы лесной экологии // Известия Уральского государственного университета. 2002. № 23. С. 48–53.
7. Петухов И.Н., Немчинова А.В. Ветровальные нарушения лесного покрова в Костромской области и на сопредельных территориях в 1984–2011 гг. // Лесоведение. 2014. № 6. С. 17–25.
8. Петухов И.Н. Роль массовых ветровалов в формировании лесного покрова в подзоне южной тайги (Костромская область): дисс. ... канд. биол. наук. Кострома, 2016. 150 с.
9. Стыценок Ф.В., Барталев С.А., Егоров В.А., Лулян 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.
10. Уваров И.А., Ершов Д.В., Крылов А.М., Барталев С.А., Лулян Е.А. Информационная система космического мониторинга санитарного состояния лесов ВЕГА-лесопатолог // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2012. Т. 9. № 5. С. 171–180.
11. Шихов А.Н. Оценка последствий стихийных природных явлений для лесных ресурсов Пермского края по многолетним рядам данных космической съемки // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2014. Т. 11. № 1. С. 21–29.
12. Шихов А.Н., Тарасов А.В. Идентификация случаев возникновения смерчей в лесной зоне по многолетним рядам данных дистанционного зондирования Земли // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2016. Т. 13. № 3. С. 84–94.
13. Bartalev S.A., Ershov D.V., Isaev A.S., Potapov P.V., Turubanova S.A., Yaroshenko A.Yu. Russia's Forests — Dominating Forest Types and Their Canopy Density. Moscow: Greenpeace Russia and RAS Centre for Forest Ecology and Productivity, 2004. (Map, scale 1:14 000 000).
14. Diffenbaugh N.S., Scherer M., Trapp R.J. Robust increases in severe thunderstorm environments in response to greenhouse forcing // Proc. National Academy of Sciences of the United States of America. 2013. Vol. 110 (41). P. 16 361–16 366.
15. Hansen M.C., Potapov P.V., Moore R., Hancher M., Turubanova S.A., Tyukavina A., Thau D., Stehman S.V., Goetz S.J., Loveland T.R., Kommareddy A., Egorov A., Chini L., Justice C.O., Townshend J.R.G. High-Resolution Global Maps of 21st-Century Forest Cover Change // Science. 2013. Vol. 342. P. 850–853.
16. Krylov A., Potapov P., Loboda T., Tyukavina A., Turubanova S., Hansen M.C., McCarty J.L. Remote sensing estimates of stand-replacement fires in Russia, 2002–2011 // Environmental Research Letters. 2014. Vol. 9 (10). Article number 105007.
17. Lassig R., Močhalov S.A. Frequency and characteristics of severe storms in the Urals and their influence on the development, structure and management of the boreal forests // Forest Ecology and Management. 2000. Vol. 135. P. 179–194.
18. Loupian E.A., Mazurov A.A., Flitman E.V., Ershov D.V., Korovin G.N., Novik V.P., Abushenko N.A., Altyntsev D.A., Koshelev V.V., Tashchilin S.A. Satellite monitoring of forest fires in Russia at federal and regional levels // Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change. 2006. Vol. 11. P. 113–145.
19. Potapov P.V., Turubanova S.A., Tyukavina A., Krylov A.M., McCarty J.L., Radeloff V.C., Hansen M.C. Eastern Europe's forest cover dynamics from 1985 to 2012 quantified from the full Landsat archive // Remote Sensing of Environment. 2015. Vol. 159. P. 28–43.
20. Schelhaas M.-J., Nabuurs G.-J., Schuck A. Natural disturbances in the European forests in the 19th and 20th centuries // Global Change Biology. 2003. Vol. 9 (11) P. 1620–1633.
21. Schlyter P., Stjernquist I., Barring L., Jönsson A.M., Nilsson C. Assessment of the impacts of climate change and weather extremes on boreal forests in northern Europe, focusing on Norway spruce // Climate Research. 2006. Vol. 31. P. 75–84.

Assessment of boreal forests vulnerability to fire- and wind-induced disturbances from long-term series of satellite observations within the Urals region

A.N. Shikhov, S.I. Perminov, E.S. Kiseleva

*Perm State University, Perm 614990, Russia
E-mail: and3131@inbox.ru*

Wildfires and windstorms are the most important disturbance agents in the boreal forests of Russia. Fire- and wind-induced forest damages may increase due to climate change. The paper presents an assessment of fire- and wind-induced forest losses in the Urals region during 2000–2014. The assessment is based on the results of the Global Forest Change project (Hansen et al., 2013) and other space imagery data sources. The total stand-replacement fires and treefalls area in the Urals' forests was estimated at 1.638 million ha, which is 1.56% of the total forested area as of

2000. Wildfires were responsible for 96.4% of total forest losses. Maximum frequency of large wildfires is recorded behind the Ural Ridge, between 64° and 65°N, 63° and 68°E, where the fire-induced forest losses achieve 10–14% of the total forest-covered area. Wind-induced forest disturbances played a significant role only in the western part of the Urals region.

The number of large forest fires and treefalls as well as their damaged area are characterized by strong interannual variability. In this regard, it is impossible to estimate statistically significant annual trend of forest losses. In addition to the interannual and intra-annual variability assessment, information on the main wildfires outbreaks and largest treefalls in the Urals boreal forests in 2000–2014 is presented.

Keywords: forest cover losses, forest fires, treefalls, LANDSAT images, Global Forest Change Map, Urals region

Accepted: 25.05.2017

DOI: 10.21046/2070-7401-2017-14-4-87-102

References

1. Alesnikov Yu.M., Pozdeev E.G., Shlykova N.A., Terinov N.N., Ivanina N.A., O posledstviyakh vetrovala 1995 g. v Visimskom goszapovednike (On the consequences of the 1995 treefall in the Visim reserve), *Lesnaya Urala i khozyaistvo v nikh*, Ekaterinburg, 1998, Vol. 20, pp. 272–278.
2. Bartalev S.A., Ershov D.V., Korovin G.N., Kotelnikov R.V., Loupian E.A., Shchepinskii V.E., Informatsionnaya sistema distantsionnogo monitoringa lesnykh pozharov (sostoyanie i perspektivy razvitiya) (The information system of remote monitoring of forest fires (current state and prospects of development)), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2008, Vol. 5, No. 2, pp. 419–429.
3. Eliseev A.V., Mokhov I.I., Chernokul'skii A.V., Vliyaniye nizovykh i torfyanykh pozharov na emissii CO₂ v atmosferu (Influence of ground and peat fires on CO₂ emissions into the atmosphere), *Doklady Akademii nauk*, 2014, Vol. 459, No. 4, pp. 496–500.
4. Koroleva N.V., Ershov D.V., Otsenka pogreshnosti opredeleniya ploshchadei vetrovalov po kosmicheskim izobrazheniyam vysokogo prostranstvennogo razresheniya LANDSAT-TM (Estimation of error in determining the forest windfall disturbances area on high spatial resolution Space images of LANDSAT-TM), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2012, Vol. 9, No. 1, pp. 80–86.
5. Krylov A.M., Malakhova E.G., Vladimirova N.A., Vyyavlenie i otsenka ploshchadei katastroficheskikh vetrovalov 2009–2010 gg. po dannym kosmicheskoi s"emki (Identification and assessment of catastrophic forest windfall disturbances in 2009–2010, according to space imagery), *Izvestiya Sankt-Peterburgskoi lesotekhnicheskoi akademii*, 2012, No. 200, pp. 197–207.
6. Mochalov S.A., Global'noe izmeneniye klimata i problemy lesnoi ekologii (Global climate change and forest ecology problems), *Izvestiya Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta*, 2002, No. 23, pp. 48–53.
7. Petukhov I.N., Nemchinova A.V., Vetroval'nye narusheniya lesnogo pokrova v Kostromskoi oblasti i na sopredel'nykh territoriyakh v 1984–2011 gg. (Forest windfall disturbances in the Kostroma region and in adjacent territories in 1984–2011.), *Lesovedeniye*, 2014, No. 6, pp. 17–25.
8. Petukhov I.N., *Rol' massovykh vetrovalov v formirovaniye lesnogo pokrova v podzone yuzhnoi taigi (Kostromskaya oblast')*. Diss. kand. biol. nauk (The role of large forest windfall disturbances in the formation of forest cover in the subzone of the southern taiga (Kostroma Region). Cand. biol. sci. thesis), Kostroma, 2016, 150 p.
9. 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.
10. Uvarov I.A., Ershov D.V., Krylov A.M., Bartalev S.A., Loupian E.A., Informatsionnaya sistema kosmicheskogo monitoringa sanitarnogo sostoyaniya lesov VEGA-lesopatolog (Information system of satellite monitoring of forest health condition “VEGA-Lesopatolog”), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2012, Vol. 9, No. 5, pp. 171–180.
11. Shikhov A.N., Otsenka posledstviy stikhiinykh prirodnykh yavlenii dlya lesnykh resursov Permskogo kraya po mnogoletnim ryadam dannykh kosmicheskoi s"emki (Estimation of forest damage from natural disasters in Perm region using the long-term series of space imagery), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2014, Vol. 11, No. 1, pp. 21–29.
12. Shikhov A.N., Tarasov A.V., Identifikatsiya sluchaev vozniknoveniya smerchei v lesnoi zone po mnogoletnim ryadam dannykh distantsionnogo zondirovaniya Zemli (Identification of tornado cases in a forest region using long-term series of remote sensing data), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2016, Vol. 13, No. 3, pp. 84–94.
13. Bartalev S.A., Ershov D.V., Isaev A.S., Potapov P.V., Turubanova S.A., Yaroshenko A.Yu., *Russia's Forests — Dominating Forest Types and Their Canopy Density*, Moscow, Greenpeace Russia and RAS Centre for Forest Ecology and Productivity, 2004, (Map, scale 1:14 000 000).
14. Diffenbaugh N.S., Scherer M., Trapp R.J., Robust increases in severe thunderstorm environments in response to greenhouse forcing, *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2013, Vol. 110 (41), pp. 16361–16366.
15. Hansen M.C., Potapov P.V., Moore R., Hancher M., Turubanova S.A., Tyukavina A., Thau D., Stehman S.V., Goetz S.J., Loveland T.R., Kommareddy A., Egorov A., Chini L., Justice C.O., Townshend J.R.G., High-Resolution Global Maps of 21st-Century Forest Cover Change, *SCIENCE*, 2013, Vol. 342, pp. 850–853.

16. Krylov A., Potapov P., Loboda T., Tyukavina A., Turubanova S., Hansen M.C., McCarty J.L., Remote sensing estimates of stand-replacement fires in Russia, 2002–2011, *Environmental Research Letters*, 2014, Vol. 9 (10), Article number 105007.
17. Lassig R., Mochalov S.A., Frequency and characteristics of severe storms in the Urals and their influence on the development, structure and management of the boreal forests, *Forest Ecology and Management*, 2000, Vol. 135, pp. 179–194.
18. Loupian E.A., Mazurov A.A., Flitman E.V., Ershov D.V., Korovin G.N., Novik V.P., Abushenko N.A., Altyntsev D.A., Koshelev V.V., Tashchilin S.A., Satellite monitoring of forest fires in Russia at federal and regional levels, *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 2006, Vol. 11, pp. 113–145.
19. Potapov P.V., Turubanova S.A., Tyukavina A., Krylov A.M., McCarty J.L., Radeloff V.C., Hansen M.C., Eastern Europe's forest cover dynamics from 1985 to 2012 quantified from the full Landsat archive, *Remote Sensing of Environment*, 2015, Vol. 159, pp. 28–43.
20. Schelhaas M.-J., Nabuurs G.-J., Schuck A., Natural disturbances in the European forests in the 19th and 20th centuries, *Global Change Biology*, 2003, Vol. 9 (11), pp. 1620–1633.
21. Schlyter P., Stjernquist I., Barring L., Jönsson A.M., Nilsson C., Assessment of the impacts of climate change and weather extremes on boreal forests in northern Europe, focusing on Norway spruce, *Climate Research*, 2006, Vol. 31, pp. 75–84.