

Многолетняя динамика потерь лесов от пожаров и ветровалов на северо-востоке Европейской России по спутниковым данным

А. Н. Шихов, А. С. Зарипов

*Пермский государственный национальный исследовательский университет, Пермь, 614990, Россия
E-mail: gis@psu.ru*

По многолетним спутниковым данным Landsat и продуктам их обработки (Global Forest Change и Eastern'Europe Forest Cover Change) проведён ретроспективный анализ нарушений лесного покрова, вызванных лесными пожарами и экстремальными погодными явлениями на северо-востоке Европейской части России (ЕЧР) за период 1985–2016 гг. Создана база данных о нарушениях лесного покрова на общей площади свыше 572 тыс. га. Из них 82,4 % площади приходится на гари, а остальные 17,6 % — на шкваловые, смерчевые ветровалы и снеголомы. Сопоставление полученных оценок площади гарей с официальными данными о лесных пожарах в Республике Коми за 1996–2016 гг. подтверждает их высокую согласованность. За 1985–2016 гг. наибольшая площадь лесов, погибших от пожаров (свыше 5 % лесопокрытой территории), зафиксирована на северо-западе и в центре Республики Коми, а также на северо-западе Пермского края. Наибольший ущерб от ветровалов наблюдался на западе Кировской области, в северо-восточной части Пермского края и на юго-востоке Республики Коми. Установлено, что на северо-востоке ЕЧР за последние 30 лет наблюдается рост площади гарей и ветровалов, однако тренд не является статистически значимым. Полученные оценки тренда отличаются от ранее опубликованных оценок для всей ЕЧР. Это различие может быть связано с проведённым более детальным анализом данных Landsat за 1985–1999 гг., в ходе которого были обнаружены ранее неизвестные крупные гари и ветровалы. Также в результате сопоставления с данными метеостанций установлено, что наиболее сильную корреляцию с площадью гибели лесов от пожаров за конкретный пожароопасный сезон имеют количество дней с максимальной температурой выше +25 и +30 °С, а также значения гидротермического коэффициента за июнь – июль.

Ключевые слова: нарушения лесного покрова, лесные пожары, ветровалы, многолетние тренды, снимки Landsat, северо-восток Европейской России

Одобрена к печати: 04.10.2018
DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-7-114-128

Введение

Нарушения лесного покрова, вызванные лесными пожарами и ветровалами, являются важнейшими естественными факторами, определяющими динамику лесных экосистем бореальной зоны (Franklin et al., 2002; Seidl et al., 2017). Режим нарушений лесного покрова определяется, с одной стороны, породным составом и возрастом лесных насаждений, а с другой — климатическими условиями (Seidl et al., 2011).

В последние десятилетия во многих регионах мира наблюдается увеличение масштабов гибели лесов от пожаров и ветровалов. В частности, отмечается рост площади пожаров в бореальных лесах Сибири (Kukavskaya et al., 2016), ветровалов в лесах Западной, Центральной и Северной Европы (Gregow et al., 2017; Seidl et al., 2011). В Европейской части России (ЕЧР) в последние годы также отмечен рост вклада лесных пожаров и ветровалов в общую площадь потерь лесов — от 1,5 % в 1986–1988 гг. до 11,3 % в 2007–2012 гг. (Potapov et al., 2015). Увеличение ущерба для лесных ресурсов от экстремальных погодных явлений считается одним из значимых негативных эффектов современного глобального потепления (Seidl et al., 2011).

В связи с этим возникает необходимость создания многолетних и однородных рядов данных для определения трендов площади нарушений лесного покрова, вызванных пожарами и ветровалами. В работе (Gregow et al., 2017) по отношению к таким рядам данных предложен термин *forest loss climatology*. Они могут быть использованы и для оценки климатической обусловленности выявленных трендов.

В ряде стран Европы многолетние базы данных о потерях лесных ресурсов в результате воздействия природных факторов были созданы на основе литературных источников и отчетов лесохозяйственных служб. Так, в работе (Schelhaas et al., 2003) представлена база данных нарушений лесного покрова, вызванных пожарами, ветровалами, снегопадами и биотическими факторами, для всей территории Европы за период с 1850 по 2000 г. и выявлен тренд увеличения площади пожаров и ветровалов. Авторы связали его с ростом доли площади хвойных лесов. Многолетние базы данных о ветровалах были созданы в Швеции (Nilsson et al., 2004) и Швейцарии (Usbeck et al., 2010). Европейским институтом леса также создана база данных о случаях штормов и нанесённом ущербе для лесного хозяйства Европы в 1951–2010 гг. (Gardiner et al., 2010).

Для территории России основным источником многолетних данных о нарушениях лесного покрова является космический мониторинг. Данные наземных и авиационных наблюдений не всегда доступны по причине обширной площади территории. Наибольшую ценность для изучения многолетних трендов ущерба от пожаров и ветровалов представляют спутниковые снимки Landsat (доступные за период с 1984 г.), а также созданные на их основе продукты Global Forest Change (GFC) (Hansen et al., 2013) и Eastern'Europe Forest Cover Change (Potapov et al., 2015). Так, на основе данных GFC была оценена площадь погибших от пожаров лесов в России за 2002–2011 гг. (Krylov et al., 2014). В рамках проекта Eastern'Europe Forest Cover Change приблизительно определена площадь крупных лесных пожаров и ветровалов в ЕЧР за 1985–2012 гг.

Аналогичные оценки площади пожаров и гарей по всей территории России были получены и по данным низкого пространственного разрешения MODIS (Барталев и др., 2015), в целом они хорошо согласуются с оценками по данным Landsat.

Особый интерес представляет анализ динамики площади пожаров и ветровалов в регионах с интенсивным лесопользованием, где эти явления наносят наиболее значительный ущерб. К таким регионам относится север ЕЧР и Урала. Различные оценки пространственно-временного распределения потерь лесов от пожаров и/или ветровалов на данной территории представлены в работах (Шихов и др., 2017; Potapov et al., 2012, 2015). Так, в работе (Potapov et al., 2012) проанализированы изменения лесного покрова на севере ЕЧР в период после распада СССР (с 1990 по 2005 г.). При этом выделялись два основных класса нарушений (вырубки и гари), а ветровалы были отнесены к классу «прочих» нарушений, так как занимали сравнительно небольшую площадь. В работе (Шихов и др., 2017) по данным GFC и другим источникам открытых данных космической съёмки получена оценка площади потерь лесов от лесных пожаров и ветровалов на территории Урала за 2000–2014 гг. Однако за этот период не удалось выявить статистически значимый тренд изменения площади гарей и ветровалов.

В работе (Potapov et al., 2015) выявлен рост площади гарей и ветровалов в целом для территории Восточной Европы. Однако, помимо выявления общего тренда, в работе не приведены другие характеристики нарушений лесного покрова (распределение по причинам возникновения, по сезонам и по площадям). Также авторы отмечали, что дефицит снимков Landsat за 90-е гг. XX в. мог негативно повлиять на качество полученных результатов и не позволил с приемлемой точностью определить год возникновения нарушений лесного покрова.

Таким образом, в настоящее время не существует полноценной многолетней базы данных о потерях лесов в результате пожаров и ветровалов как в целом по ЕЧР, так и по данному региону, а имеющиеся оценки многолетних трендов носят предварительный характер. Также не проводились какие-либо оценки климатической обусловленности возникновения крупных лесных пожаров и ветровалов.

Целью настоящего исследования является создание на основе спутниковых снимков Landsat и источников дополнительной информации максимально полной и репрезентативной базы

данных о потерях лесов в результате пожаров и экстремальных погодных явлений (шквалов, смерчей, снегопадов и гололёда) на северо-востоке ЕЧР (включая республику Коми, Кировскую область, Удмуртию и Пермский край). Достижимость поставленной цели обусловлена тем, что весной 2018 г. на сервере Геологической службы США USGS (<https://earthexplorer.usgs.gov>) стали доступны все снимки со спутника Landsat-5, полученные в 1990-е гг. Это позволяет значительно повысить качество ретроспективного анализа нарушений лесного покрова. В частности, появилась возможность уточнить оценки многолетних трендов площади гарей и ветровалов, а также сопоставить их с климатическими рядами данных реперных метеостанций Росгидромета.

Исходные данные и методы исследования

Проведённое исследование является продолжением работы (Шихов и др., 2017), что предполагает использование аналогичных источников информации и методики их обработки. В качестве информационной основы за период 2001–2016 гг. были использованы данные GFC (Hansen et al., 2013), полученные на открытом сервисе (<http://earthenginepartners.appspot.com/google.com/gMG7KbLG>). В июне 2018 г. было проведено очередное обновление этого продукта, что позволило получить оценку потерь лесного покрова за 2016 г.

Верификация данных GFC и определение дат нарушений лесного покрова проведена по исходным снимкам LANDSAT TM, ETM+ и OLI, а также Sentinel-2 (с 2015 г.), полученным с веб-сервиса Геологической службы США (<https://earthexplorer.usgs.gov/>). Для определения типов ветровальных нарушений (разделения шкваловых и смерчевых ветровалов) также использованы снимки сверхвысокого разрешения с сервиса ESRI Imagery. Подробнее использованная методика идентификации смерчевых ветровалов описана в статье (Shikhov, Chernokulsky, 2018).

Анализ климатической обусловленности гибели лесов от пожаров проведён по данным с 15 реперных метеостанций Росгидромета, расположенных на севере исследуемой территории, в основном в Республике Коми. Данные получены с веб-сервиса ВНИИГМИ-МЦД (<http://aisori.meteo.ru/ClimatR>). Климатические данные по южной части территории не использовались по причине крайне редкого возникновения крупных лесных пожаров в Удмуртии, на юге Кировской области и Пермского края.

Методика идентификации по данным GFC нарушений лесного покрова, вызванных лесными пожарами и ветровалами, описана в статье (Шихов и др., 2017), в ней же приведены и оценки точности полученных данных. В рамках настоящей работы было проведено обновление базы данных по состоянию на 2016 г., а также добавлены данные по территории западной части Республики Коми и Кировской области. Помимо гарей и ветровалов, был добавлен ещё один класс нарушений лесного покрова — снеголомы, т.е. нарушения, вызванные сильным ветром в сочетании с мокрым снегом. Более подробно они рассмотрены в разделе «Результаты и обсуждение».

Обработка данных *Eastern'Europe Forest Cover Change*

Данные о нарушениях лесного покрова за 1985–2000 гг. были получены на основе продукта *Eastern'Europe Forest Cover Change* (EEFCC) (Potapov et al., 2015) и анализа исходных снимков Landsat-4/5 TM и Landsat-7 ETM+ (с 1999 г.). Продукт EEFCC был создан группой специалистов лаборатории GLAD (Global Land Analysis and Discovery) при университете штата Мэриленд. Данные доступны по ссылке <https://glad.umd.edu/dataset/eastern-europe-forset-cover-dynamics-1985-2012/>.

Данные о нарушениях лесного покрова (loss data) представлены в виде раstra с размером ячейки 30 м. Они включают четыре класса: потери лесного покрова за 1986–1988, 1989–2000, 2001–2006 и 2007–2012 гг. Такие временные интервалы были выбраны разработчиками с целью

минимизации влияния пропусков в исходных рядах спутниковых наблюдений. Наиболее значительные пропуски имели место в 1991–1998 и 2003–2005 гг.

В работе (Potarov et al., 2015) приведены также оценки точности полученных данных. Точность производителя и точность пользователя при определении нарушений лесного покрова оцениваются в 88 и 89 % соответственно. Это сопоставимо с точностью продукта GFC (для которого эти показатели составляют 93,9 и 88,0 %).

Идентификация нарушений лесного покрова, вызванных пожарами и ветровалами за 1985–2000 гг., производилась в два этапа. На первом этапе по данным EEFCC выделялись нарушения, которые можно было однозначно идентифицировать как гари или ветровалы по геометрическим признакам. Для гарей в большинстве случаев характерна квазиокруглая или овальная форма (вытянутая по направлению ветра), а для ветровалов — квазилинейная или веерная форма (Shikhov, Chernokulsky, 2018). Участки снеголомов имеют сложную пространственную структуру и неопределённую форму.

Так как многие ветровалы имели веерную структуру с большим числом небольших по площади участков, при выделении по данным EEFCC были удалены участки площадью менее 0,18 га (что соответствует двум пикселям съёмочной системы Landsat). Такие участки имеют низкую достоверность определения, также их площадь по данным Landsat может быть сильно завышена (Королева, Ершов, 2012). На втором этапе для каждого выделенного объекта производилась верификация и определение дат событий путём сопоставления разновременных снимков Landsat.

При выявлении гарей и ветровалов за 1985–2000 гг. возникает ряд методических сложностей (в сравнении с идентификацией по данным GFC за период после 2000 г.):

- Некоторые участки нарушений, произошедших в рассматриваемый период, впоследствии подверглись санитарной рубке, или же были вырублены окружающие их лесные массивы. В частности, это характерно для крупных ветровалов в южной части рассматриваемой территории. В результате эти ветровалы невозможно было идентифицировать по данным EEFCC. Однако получение большого числа сцен Landsat позволило обнаружить такие объекты на общей площади свыше 6 тыс. га. Выделение ветровалов в таких случаях выполнялось на основе анализа разновременных снимков Landsat, полученных до и после события. По летним снимкам выделение производилось на основе разности индекса SWVI по методике (Крылов, Владимирова, 2011), для зимних снимков был применён порог разности яркостей в красном канале (который позволяет надёжно выделить потери леса при наличии снежного покрова на разновременных изображениях). Небольшие по площади объекты были оцифрованы вручную.
- Отсутствие данных спутникового мониторинга активных пожаров (Active Fire Data) за период до 2000 г. В связи с этим гари выделялись только по их геометрическим признакам и спектральным особенностям, рассмотренным в работе (Potarov et al., 2012).
- Отсутствие снимков сверхвысокого разрешения, что влияет на определение типа ветровала (шквалового или смерчевого). Смерчевые ветровалы определялись только по двум из трёх признаков, использованных в работе (Shikhov, Chernokulsky, 2018), — это линейная форма и сплошной характер повреждения древостоя. Также для смерчевых ветровалов характерны плавные изменения направления движения в пределах 10–20°. Примеры идентификации гарей и разных типов ветровалов по снимкам Landsat и данным EEFCC приведены на *рис. 1* (см. с. 55).
- Невозможность определить год нарушения лесного покрова непосредственно по данным EEFCC. Для определения года и диапазона дат появления нарушения получено свыше 700 сцен Landsat на рассматриваемую территорию. Как указано выше, это стало возможным только в 2018 г. в связи с публикацией полного ряда наблюдений со спутника Landsat-5 за 1990-е гг. на сервере USGS. В ряде случаев точно удалось определить дату события. Во-первых, для 45 случаев лесных пожаров были получены снимки Landsat за период активного горения. Во-вторых, для уточнения вероятных дат некоторых ветровалов (шкваловых и смерчевых) были получены архивы данных Пермского и Удмуртского центров по гидрометеорологии и мониторингу окружающей

среды о случаях опасных явлений погоды, а также данные реанализа CFS. В результате удалось определить точные даты возникновения четырёх случаев наиболее крупных ветровалов в 1985–1999 гг. (на которые приходится 65 % от всей площади ветровалов за этот период).

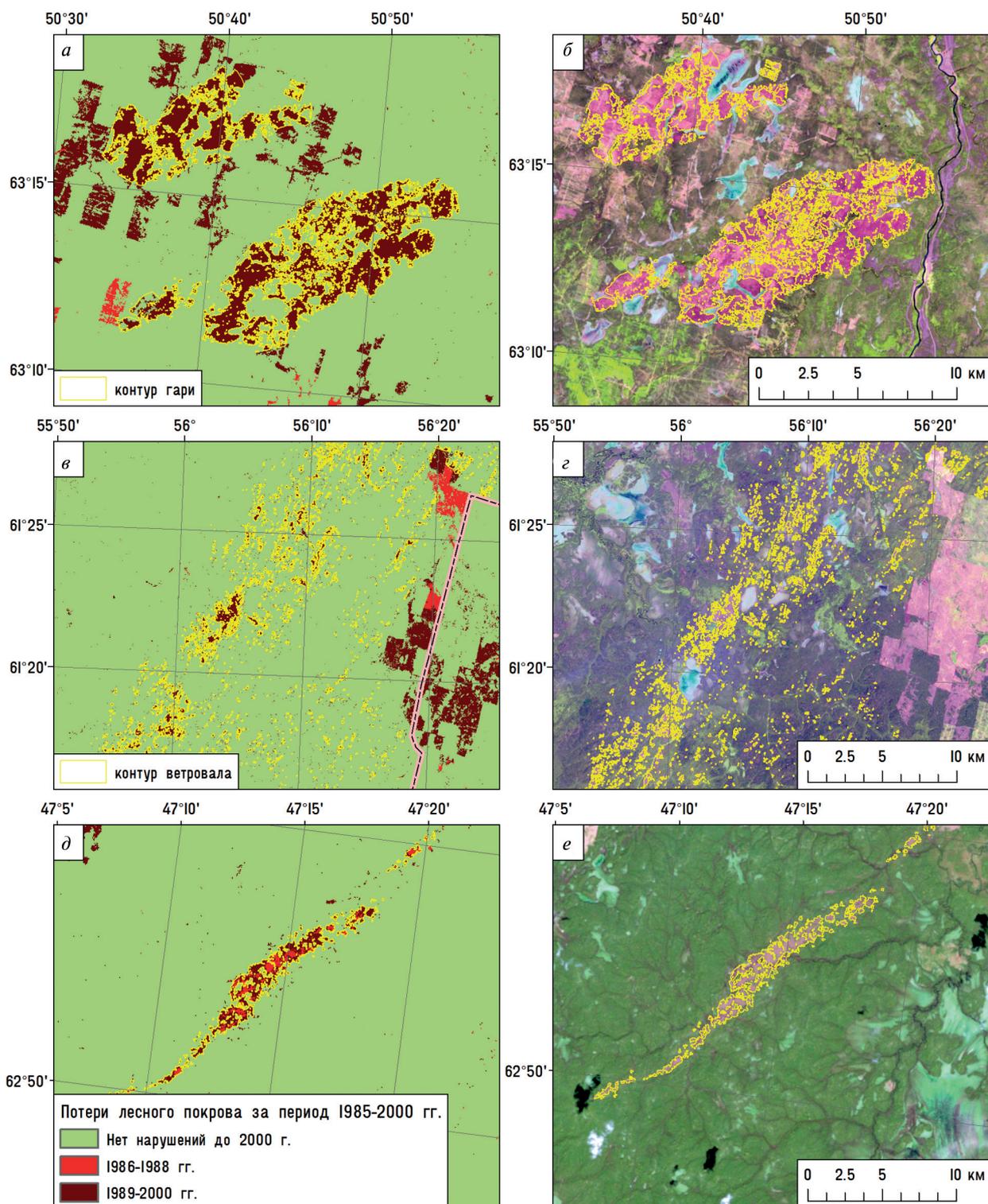


Рис. 1. Идентификация гарей (а, б), шкваловых ветровалов (в, г) и смерчевых ветровалов (д, е) по данным ЕЕFCC и снимкам Landsat за 1985–1999 гг.

На заключительном этапе из базы данных были удалены гари и шкваловые ветровалы на площади менее 25 га и смерчевые ветровалы на площади менее 5 га. В целом использование (помимо данных ЕЕФСС) большого количества дополнительной информации позволило минимизировать пропуски гарей и ветровалов. Также в данных ЕЕФСС был выявлен ряд неточностей в определении дат. В частности, гари от лесных пожаров, произошедших в 1997–1998 гг., были отнесены к периоду 2001–2006 гг.

Оценка точности данных о площади гарей по территории Республики Коми

Валидация полученной оценки площади гарей проведена для территории Республики Коми. В Государственных докладах о состоянии окружающей среды Республики Коми (2001–2016) (<http://www.agiks.ru/gd.php?cat=3>) представлены сведения о площади лесных пожаров за 1996–2016 гг., а также за некоторые предшествующие годы (1988, 1992). Данные получены по результатам наземного и авиационного патрулирования лесов. Они могут использоваться для частичной валидации полученной оценки площадей гарей. Однако при этом нужно учитывать, что в Государственных докладах представлены сведения обо всех пожарах, а по спутниковым данным оценивалась площадь погибших лесов, причём только от крупных пожаров (свыше 25 га). Результаты сопоставления приведены на *рис. 2*.

В большинстве случаев площадь гарей оказалась меньше площади пожаров, но в целом оценка площади гарей имеет высокую согласованность с официальными данными, коэффициент корреляции Спирмена равен 0,86. В те годы, когда площадь гарей по спутниковым данным была минимальной (2009, 2012, 2014, 2015), она оказалась значительно ниже площади пожаров. В эти годы могла быть значительной доля весенних (майских) пожаров, которые обычно не приводят к гибели или сильным повреждениям лесов (Барталев и др., 2015). Наоборот, в годы с массовыми вспышками лесных пожаров в летний период (2000, 2010, 2011, 2013) официальные оценки пройденной ими площади совпадают с площадями гарей по спутниковым данным.

В 1997–1999 гг. площадь гарей по спутниковым данным была значительно ниже площади, пройденной пожарами (по официальным данным), что может быть связано с дефицитом безоблачных снимков за эти годы. В результате некоторые гари 1998–1999 гг. могли быть ошибочно отнесены к 2000 г. Второй причиной занижения может являться значительный процент малоинтенсивных весенних пожаров.

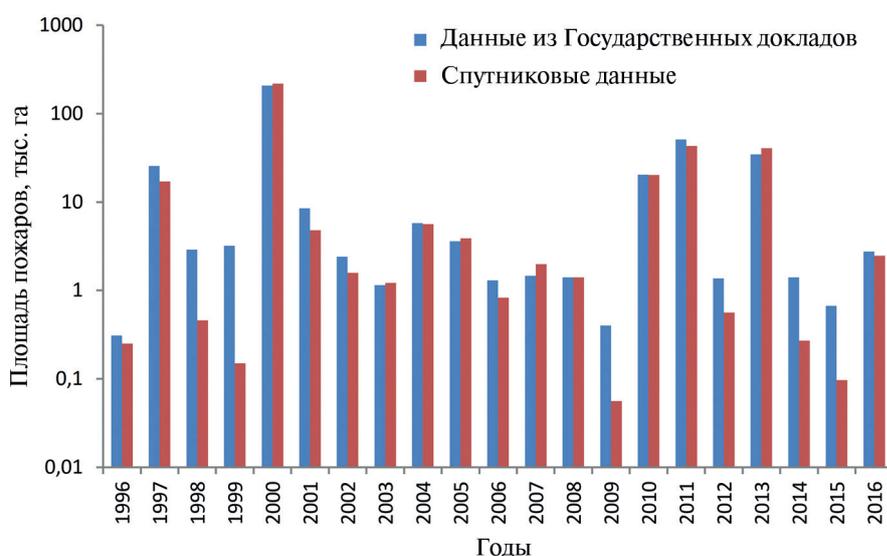


Рис. 2. Сопоставление полученных оценок площади гарей с официальными данными о площади пожаров (Государственные доклады 2001–2016, <http://www.agiks.ru/gd.php?cat=3>)

Результаты и обсуждение

Пространственное распределение и распределение площади гарей и ветровалов

Всего в созданной базе данных представлена информация о 1089 нарушениях лесного покрова за период 1985–2016 гг. Их распределение по территории показано на *рис. 3*, а по причинам возникновения — в *табл. 1*.

Таблица 1. Распределение нарушений лесного покрова по причинам возникновения

Причина возникновения	Количество	Площадь, тыс. га
Пожар	843	471,85
Шкваловый ветровал	141	84,03
Смерчевый ветровал	107	11,84
Снеголом	7	4,30

Как следует из *табл. 1* и *рис. 3* (см. с. 59), за 1985–2016 гг. наибольшая площадь погибших лесов (свыше 5 % от лесопокрытой территории по состоянию на 2000 г.) зафиксирована в северо-западной и центральной части Республики Коми и на северо-западе Пермского края. На данной территории широко распространены сосновые леса (Bartalev et al., 2004), которые отличаются высокой горимостью, но низкой подверженностью ветровалам.

В свою очередь, наибольший ущерб от ветровалов наблюдался в районах произрастания темнохвойных лесов: на западе Кировской области, в северо-восточной части Пермского края и на юго-востоке Республики Коми. Следует также отметить, что к югу от 60° с.ш. крупных лесных пожаров практически не было (исключением стал лишь пожароопасный сезон 2010 г.), а основной ущерб для лесных ресурсов связан с рядом крупных ветровалов, произошедших в 1989, 1990, 2004, 2009, 2012 и 2014 гг.

Распределение гарей и ветровалов по площади проиллюстрировано с помощью кривых Лоренца (*рис. 4*, см. с. 59). Как для гарей, так и для ветровалов характерно неравномерное распределение площадей, при котором на 10 % самых крупных объектов приходится свыше 50 % их общей площади. Причём для ветровалов эта неравномерность существенно выше: 10 % крупнейших ветровалов занимают 67 % от их суммарной площади.

Большинство крупных ветровалов (имеющих площадь свыше 1000 га) связаны с прохождением шквалов и имеют характерную веерную структуру (см. *рис. 3*). Наибольший ущерб для лесного покрова был вызван шквалами 04.07.1992, 29.06.1993, 30.06.1993, 07.06.2009, 16.06.2009 и 18.07.2012, площадь ветровалов от которых составила свыше 5000 га в каждом случае. Крупнейшие смерчевые ветровалы зафиксированы 07.06.2009 в Пермском крае и 17.06.2013 в Кировской области. Их площадь составила 1263 и 1456 га соответственно.

Два случая ветровалов обусловлены одновременным воздействием налипания снега и сильного ветра, в *табл. 1* они обозначены как снеголомы. В отличие от шкваловых или смерчевых ветровалов, снеголомы характерны только для горных темнохвойных лесов Урала, наименее устойчивых к воздействию сильных ветров и налипания снега. Первый из двух случаев произошёл 6 июня 1995 г. в западной части Свердловской области в районе Висимского заповедника. Он был вызван аномальными по интенсивности осадками в виде мокрого снега (до 50 мм/12 ч) в сочетании с ветром до 24–28 м/с. Этот случай подробно описан в литературе (Мочалов, 2002; Lassig, Mochalov, 2000). На основе сопоставления снимков Landsat за 1994 и 1996 гг. площадь погибшего леса оценена в 20,2 тыс. га, однако в пределы изучаемой территории попадает менее 1 % от площади этого ветровала. Второй подобный случай произошёл 8 октября 2015 г. на Северном Урале. Общая площадь ветровала составила свыше 5000 га, в том числе 3955 га в Пермском крае, в основном в пределах Вишерского заповедника.

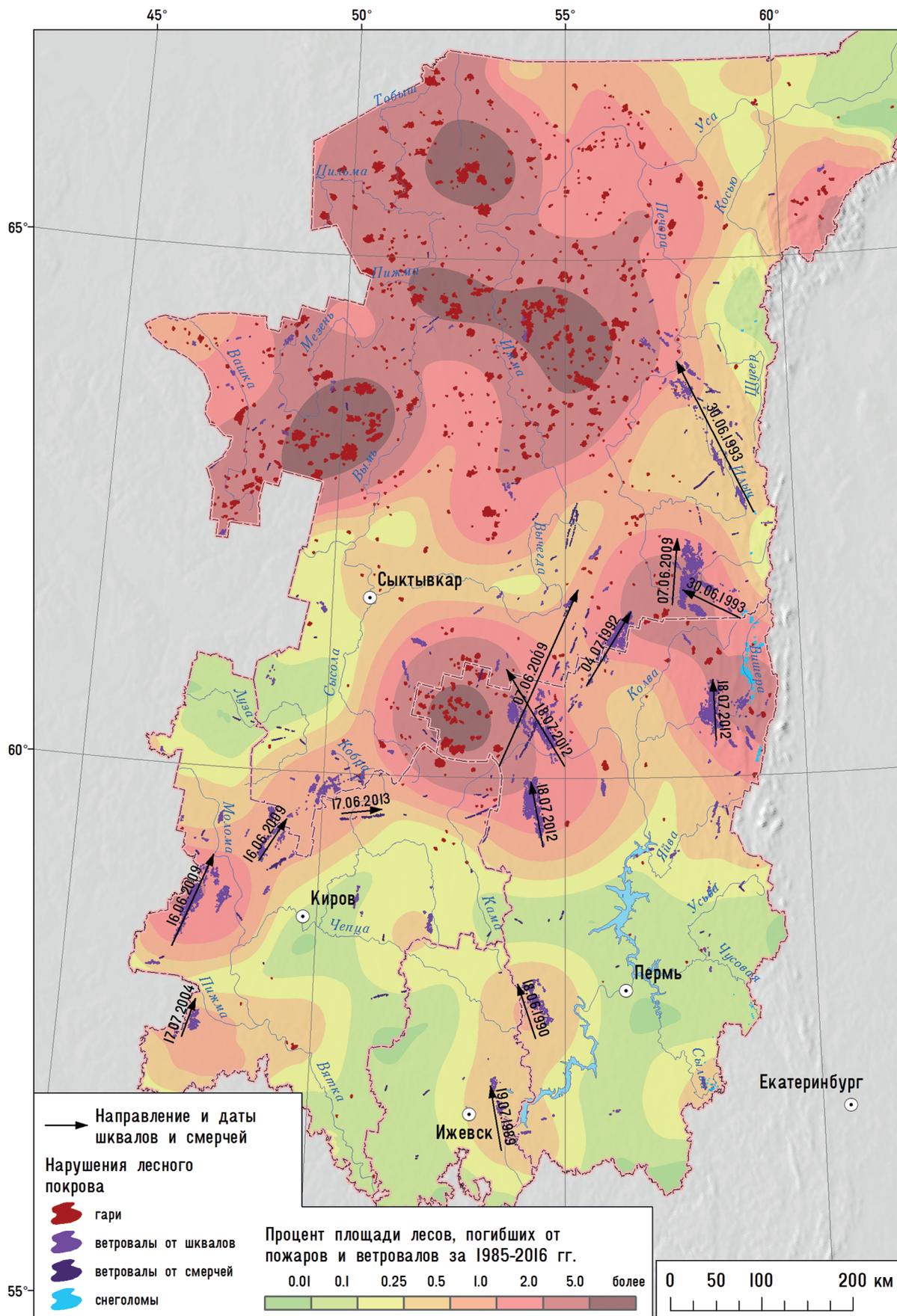


Рис. 3. Пространственное распределение нарушений лесного покрова, вызванных пожарами, ветровалами и снеголомами на северо-востоке ЕЧР за 1985–2016 гг.

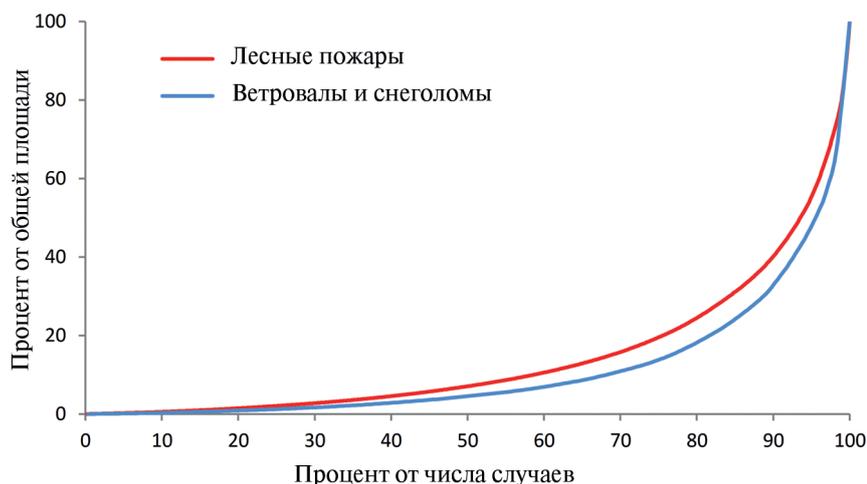


Рис. 4. Кривые Лоренца, характеризующие распределение площадей гарей и ветровалов

Межгодовая и внутригодовая изменчивость

Многолетняя динамика площади лесов, погибших от пожаров и ветровалов, характеризуется значительными межгодовыми колебаниями (рис. 5). Наибольшая площадь гарей зафиксирована в 2000 г. (свыше 221 тыс. га), также в 2010, 2011 и 2013 гг., когда площадь гибели лесов от пожаров составила от 41,3 до 56,3 тыс. га. Причём в 2010 г. наибольшие площади гарей выявлены на северо-западе Пермского края, а в остальные годы — в Республике Коми. В 1988–1989 гг., когда в рассматриваемом регионе также наблюдалось жаркое и засушливое лето, площадь гарей оказалась значительно меньше (16,5 и 12,5 тыс. га соответственно). В отдельные годы с прохладным и влажным летом (1986, 1992, 2009, 2014) площадь лесов, погибших от пожаров, была близка к нулю.

Площади ветровалов были максимальными в 1993, 2009 и 2012 гг. Эти максимумы обусловлены случаями сильных шквалов с большим охватом территории, которые наблюдались 29.06.1993, 07.06.2009, 16.06.2009 и 18.07.2012 (см. рис. 3). В отдельные годы (1985, 1999, 2001) крупные ветровалы не зафиксированы.

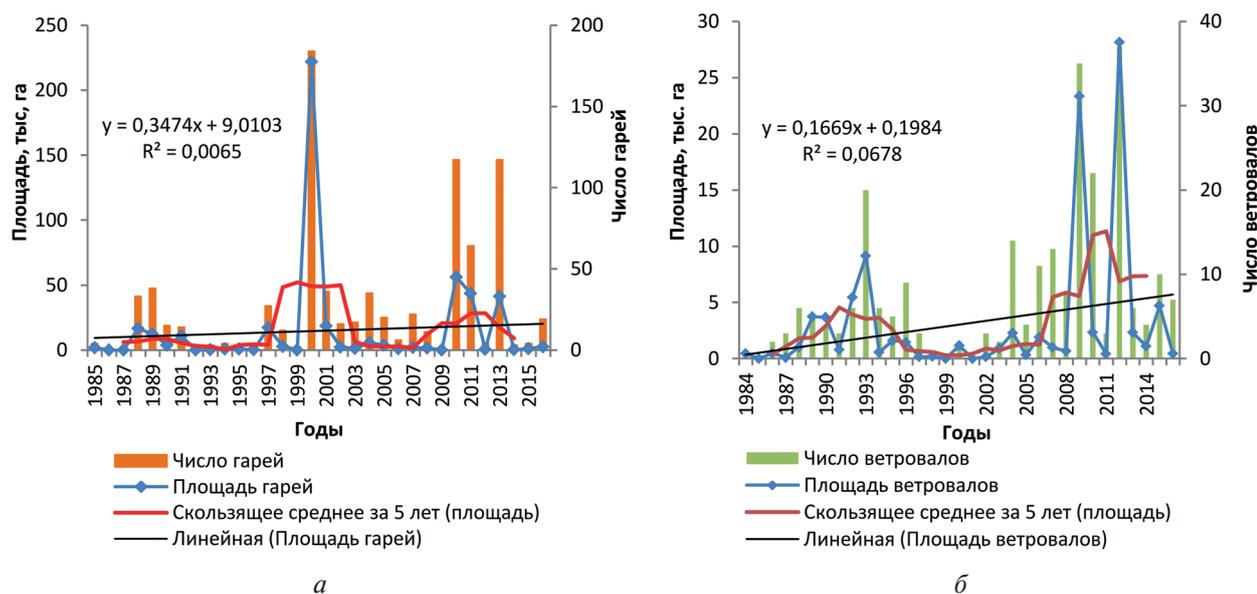


Рис. 5. Годовой ход количества крупных пожаров, вызвавших гибель лесов, и их площади (а); количества ветровалов и их площади (б)

Линейный тренд площади гарей и ветровалов — восходящий, но статистически он незначим. Для оценки значимости линейного тренда использованы коэффициенты корреляции Спирмена и Кендалла, поскольку распределение площадей по годам далеко от нормального. Полученные значения коэффициентов незначимы на уровне 5 % (табл. 2). С учётом резких межгодовых колебаний площади гарей и ветровалов было проведено также логарифмическое преобразование рядов. Однако и после этого коэффициенты корреляции остались незначимыми. Таким образом, полученные результаты отличаются от представленных в работе (Potapov et al., 2015), в которой для всей ЕЧР был выявлен статистически значимый тренд увеличения площади гарей и ветровалов.

Таблица 2. Оценка статистической значимости многолетних трендов площади гарей и ветровалов по ежегодным данным

Показатель	R Спирмена/уровень значимости	R Кендалла/уровень значимости
Площадь гарей	0,17/0,34	0,10/0,42
Площадь ветровалов	0,24/0,18	0,18/0,15

В многолетней динамике площади гибели лесов от пожаров прослеживается наличие 11-летнего цикла, обусловленного метеоусловиями пожароопасных сезонов. Наличие циклов продолжительностью 10–14 лет подтверждается и по данным наземного и авиационного мониторинга пожаров в Республике Коми (Государственные доклады 2001–2016, <http://www.agiks.ru/gd.php?cat=3>). Период высокой пожарной опасности в лесах и значительный рост площади гибели лесов повторяется через 10–14 лет и продолжается 2–3 года.

Распределение площади гибели лесов от пожаров и ветровалов по месяцам года оценено с некоторой степенью неопределённости, поскольку для 16 % гарей и 9 % ветровалов не удалось определить месяц возникновения (рис. 6). Наибольшая площадь пожаров, вызывающих гибель лесов (69 % от общей площади гарей), приходится на июль, как и в целом по территории России (Барталев и др., 2015). Однако в 1997 и 2010 гг. крупные вспышки лесных пожаров наблюдались также в августе. В июне хорошее увлажнение подстилающей поверхности способствует снижению пожароопасности. Исключением является июнь 1989 г., который был теплее нормы на 5–7°, вследствие чего крупные лесные пожары наблюдались в Республике Коми.

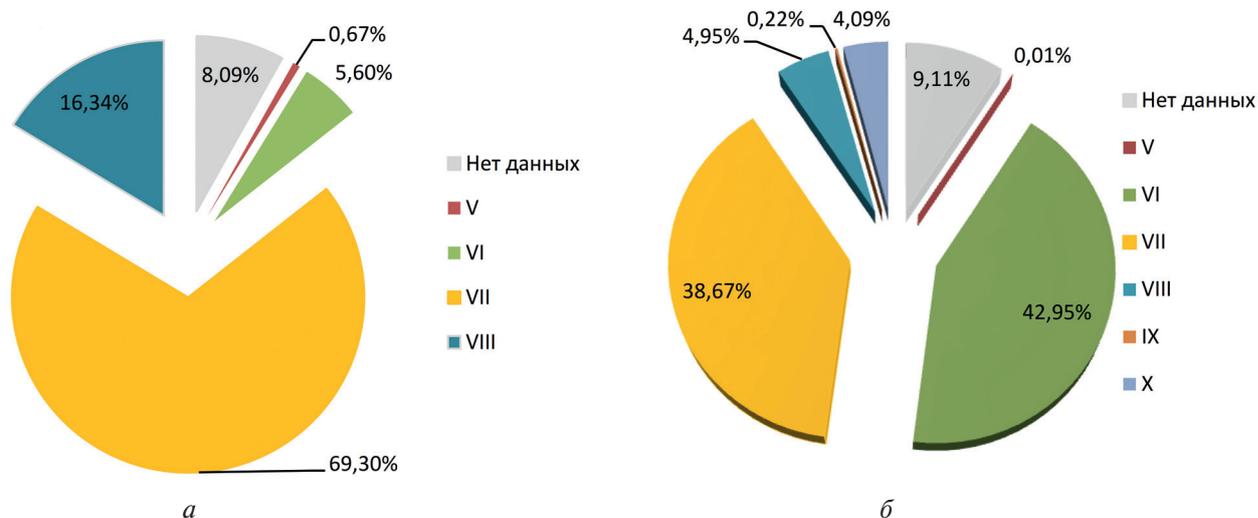


Рис. 6. Внутригодовое распределение площади лесов, погибших от пожаров (а) и ветровалов (б)

Большинство ветровалов, наоборот, происходит в июне, что соответствует сезонному максимуму повторяемости шквалов и смерчей. Снеголомы на *рис. 6* показаны совместно с ветровалами, поэтому 4,1 % площади ветровалов приходится на октябрь.

Зависимости площади гарей от метеорологических условий пожароопасного периода

Для анализа климатической обусловленности возникновения крупных пожаров, вызывающих гибель лесов, рассмотрены такие показатели, как средняя температура воздуха, количество осадков, гидротермический коэффициент и число дней с максимальной температурой выше +30 и +25 °С. Первые три показателя рассчитаны как за пожароопасный период (с мая по август), так и за отдельные месяцы. Для расчётов получены данные 15 реперных метеостанций Росгидромета, расположенных в северной части исследуемой территории. Оценка значимости зависимостей выполнялась по значениям коэффициентов корреляции Спирмена и Кендалла (*табл. 3*).

Таблица 3. Оценка значимости зависимостей годовой площади лесов, погибших от пожаров, от климатических переменных

Климатическая переменная	Период	R Спирмена/уровень значимости	R Кендалла/уровень значимости
Средняя температура воздуха	май – август	0,56/0,0008	0,41/0,0009
	июнь – август	0,54/0,001	0,38/0,002
	июль	0,56/0,0008	0,39/0,002
Количество осадков	май – август	-0,35/0,048	-0,26/0,035
	май – июль	-0,43/0,014	-0,31/0,01
	июнь – август	-0,35/0,048	-0,26/0,033
	июнь – июль	-0,49/0,004	-0,35/0,004
	июль	-0,43/0,014	-0,29/0,02
Гидротермический коэффициент	июнь – август	-0,52/0,002	-0,37/0,002
	июнь – июль	-0,62/0,0001	-0,46/0,0002
	июль	-0,57/0,0006	-0,37/0,0017
Число дней с T_{\max} выше +30 °С	май – август	0,65/0,000059	0,49/0,00009
Число дней с T_{\max} выше +25 °С	май – август	0,68/0,000016	0,52/0,00003

Для всех рассмотренных переменных выявлена статистически значимая (при уровне значимости 5 %) корреляция с площадью лесов, погибших от пожаров. Наиболее сильной является зависимость площади гарей от количества дней в году с максимальной температурой выше +25 и +30 °С. Эта зависимость отражает тот факт, что пожары, вызывающие гибель лесов, чаще возникают на фоне продолжительной жаркой и сухой погоды. Хорошо выражена также зависимость от средней температуры летнего сезона и отдельных месяцев. Несколько слабее зависимости площади гарей от количества осадков, причём наиболее тесная связь прослеживается с суммой осадков, выпавших в июне – июле. Аналогичная закономерность характерна и для гидротермического коэффициента — наиболее тесную связь с площадью гарей имеют его значения в июне – июле.

Помимо метеоусловий, на площадь гибели лесов от пожаров оказывает влияние ряд факторов, в частности труднодоступность мест их возникновения, а также своевременность и эффективность работ по их тушению. Так, наиболее засушливыми на рассматриваемой территории были пожароопасные сезоны 2011 и 2013 гг., однако наибольшая площадь гарей отмечена в 2000 г. Неконтролируемое распространение пожаров в июле 2000 г. на площади свыше 200 тыс. га можно связать именно с негативными явлениями в системе мониторинга и тушения лесных пожаров в период экономического кризиса 1990-х гг.

Заключение

В результате проведённого исследования впервые создан многолетний ряд данных о нарушениях лесного покрова, вызванных пожарами и ветровалами на территории северо-востока ЕЧР, которая является важной сырьевой базой лесной промышленности России. В связи с появлением в открытом доступе полного архива снимков Landsat за 1990-е гг. XX в. удалось существенно уточнить ранее полученные оценки площади гарей и ветровалов в этот период, их многолетнего тренда, а также даты наиболее значимых событий. Полученная база данных о нарушениях лесного покрова, вызванных природными факторами, по полноте и репрезентативности не имеет аналогов в России. Проведённое сопоставление полученных оценок площади гарей с данными о площадях лесных пожаров в Республике Коми за 1998–2016 гг. подтверждает их достоверность.

Установлено, что на северо-востоке ЕЧР в последние 30 лет наблюдается рост площади лесов, погибших от пожаров и ветровалов, однако тренды статистически незначимы. Полученные результаты отличаются от представленных в работе (Potapov et al., 2015), в которой для всей ЕЧР был выявлен статистически значимый тренд увеличения площади гарей и ветровалов. Это различие может быть связано с проведённым более детальным анализом данных Landsat за 1985–1999 гг., в ходе которого были обнаружены ранее неизвестные крупные гари и ветровалы. Также в многолетнем ходе площади гарей выявлен 11-летний цикл, связанный с повторением засушливых летних сезонов.

На основе сопоставления с данными 15 метеостанций выявлены зависимости площади гарей от метеорологических условий пожароопасного периода. Установлено, что наиболее сильную корреляцию с площадью гарей имеет количество дней с максимальной температурой выше +25 и +30 °С за пожароопасный период, а также значения гидротермического коэффициента за июнь – июль. Однако метеоусловия не позволяют полностью объяснить многолетнюю динамику площади гибели лесов от пожаров.

Что касается многолетней динамики площади ветровалов, то она обусловлена отдельными штормовыми событиями, не имеющими очевидной связи с погодными условиями летнего периода в целом. Массовые ветровалы происходили как в холодные (1992, 2009), так и в жаркие засушливые летние сезоны (2010, 2013).

Исследование проведено при финансовой поддержке гранта Президента РФ № МК-801.2017-5 и РФФИ (проект № 16-05-590056-р-а).

Литература

1. *Барталев С. А., Стыценко Ф. В., Егоров В. А., Луян Е. А.* Спутниковая оценка гибели лесов России от пожаров // *Лесоведение*. 2015. № 2. С. 83–94.
2. *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.
3. *Крылов А. М., Владимирова Н. А.* Дистанционный мониторинг состояния лесов по данным космической съемки // *Геоматика*. 2011. № 3. С. 53–58.
4. *Мочалов С. А.* Глобальное изменение климата и проблемы лесной экологии // *Известия Уральского гос. ун-та*. 2002. № 23. С. 48–53.
5. *Шихов А. Н., Перминов С. И., Киселева Е. С.* Оценка подверженности бореальных лесов Урала воздействию лесных пожаров и ветровалов по многолетним рядам спутниковых наблюдений // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2017. Т. 14. № 3. С. 87–102.
6. *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. M.: Greenpeace Russia and RAS Centre for Forest Ecology and Productivity, 2004 (Map, scale 1:14 000 000). URL: <http://forestforum.ru/info/pictures/eng-map.pdf>.

7. Franklin J. F., Spies T. A., Pelt R. V., Carey A. B., Thornburgh D. A., Berg D. R., Lindenmayer D. B., Harmon M. E., Keeton W. S., Shaw D. C., Bible K., Chen J. Disturbances and structural development of natural forest ecosystems with silvicultural implications, using Douglas-fir forests as an example // *Forest Ecology and Management*. 2002. V. 155. P. 399–423.
8. Gardiner B., Blennow K., Carnus J.-M., Fleischer P., Ingemarson F., Landmann G., Lindner M., Marzano M., Nicoll B., Orazio C., Peyron J.-L., Reviron M.-P., Schelhaas M.-J., Schuck A., Spielmann M., Usbeck T. Destructive Storms in European Forests: Past and Forthcoming Impacts. Final report to European Commission – DG Environment. European Forest Institute, 2010. 138 p. URL: http://ec.europa.eu/environment/forests/pdf/STORMS%20Final_Report.pdf.
9. Gregow H., Laaksonen A., Alpe M. E. Increasing large scale windstorm damage in Western, Central and Northern European forests, 1951–2010 // *Scientific Reports*. 2017. V. 7. Art. No. 46397.
10. 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. V. 342. P. 850–853.
11. 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. V. 9(10). Art. No. 105007.
12. Kukavskaya E. A., Buryak L. V., Shvetsov E. G., Conard S. G., Kalenskaya O. P. The impact of increasing fire frequency on forest transformations in southern Siberia // *Forest Ecology and Management*. 2016. V. 382. P. 225–235.
13. 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. V. 135. P. 179–194.
14. Nilsson C., Stjernquist I., Barring L., Schlyter P., Jönsson A. M., Samuelsson H. Recorded storm damage in Swedish forests 1901–2000 // *Forest Ecology and Management*. 2004. V. 199(1). P. 165–173.
15. Potapov P., Turubanova S., Zhuravleva I., Hansen M., Yaroshenko A., Manisha A. Forest Cover Change within the Russian European North after the Breakdown of Soviet Union (1990–2005) // *Intern. J. Forestry Research*. 2012. Art. ID 729614.
16. 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. V. 159. P. 28–43.
17. Schelhaas M.-J., Nabuurs G.-J., Schuck A. Natural disturbances in the European forests in the 19th and 20th centuries // *Global Change Biology*. 2003. V. 9(11) P. 1620–1633.
18. Seidl R., Schelhaas M. J., Lexer M. J. Unraveling the drivers of intensifying forest disturbance regimes in Europe // *Global Change Biology*. 2011. V. 17(9). P. 2842–2852.
19. Seidl R., Thom D., Kautz M., Martin-Benito D., Peltoniemi M., Vacchiano G., Wild J., Ascoli D., Petr M., Honkaniemi J., Lexer M. J., Trotsiuk V., Mairota P., Svoboda M., Fabrika M., Nagel T. A., Reyser C. P. O. Forest disturbances under climate change // *Nature Climate Change*. 2017. V. 7(6). P. 395–402.
20. Shikhov A. N., Chernokulsky A. V. A satellite-derived climatology of unreported tornadoes in forested regions of northeast Europe // *Remote Sensing of Environment*. 2018. V. 204. P. 553–567.
21. Usbeck T., Wohlgemuth T., Dobbertin M., Pfister C., Bürgi A., Rebetez M. Increasing storm damage to forests in Switzerland from 1858 to 2007 // *Agricultural and Forest Meteorology*. 2010. V. 150(1). P. 47–55.

Long-term dynamics of fire- and wind-related forest losses in northeast European Russia from satellite data

A. N. Shikhov, A. S. Zaripov

Perm State University, Perm 614990, Russia

E-mail: gis@psu.ru

The paper presents a long-term analysis of fire-related and storm-induced forest disturbances in the northeast European Russia for 1985–2016. The forest disturbances are identified with the use of Landsat images, Global Forest Change data (for 2000–2014) and Eastern Europe Forest Cover

Change data (for 1985–2000). We created the database which contains the data on forest disturbances (burned areas and windthrows) with a total area of 572 thousand ha; 82.4 % of them are burned areas, and the remaining 17,6 % include storm-, tornado- and snow-induced forest damage. The comparison of the identified burned areas with official forest fire data for Komi Republic (for 1996–2016) shows their high degree of coincidence. In 1985–2016, more than 5 % of forest-covered areas were damaged by wildfires in the northwestern and central parts of Komi Republic, and also in the northwest of Perm Krai. Storm-induced forest damage was the most significant in the western part of Kirov region, in the northeast of Perm Krai and southeast of Komi republic. It is shown that the fire-related and storm-induced forest damage increases in the last 30 years. However, the linear trends are statistically insignificant. The estimated trends of forest damaged areas differ from previously published estimates for the entire European Russia. These differences may be related to our more detailed analysis of Landsat images for 1985–1999, because we discovered many previously unknown burned areas and windthrows. Also, we estimated the influence of weather condition of summer season on fire-damaged area based on the data of 15 weather stations. The number of days with maximum temperature higher than +25 and +30 °C, and also the hydrothermal coefficient, averaged for June and July, have the strongest correlation with fire-related forest damage.

Keywords: forest disturbances, wildfires, windthrows, long-term trends, Landsat images, northeast of European Russia

Accepted: 04.10.2018

DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-7-114-128

References

1. Bartalev S. A., Stytsenko F. V., Egorov V. A., Loupian E. A., Sputnikovaya otsenka gibeli lesov Rossii ot pozharov (Satellite-based assessment of Russian forest fire mortality), *Lesovedenie*, 2015, No. 2, pp. 83–94.
2. 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.
3. Krylov A. M., Vladimirova N. A., Distantsionnyi monitoring sostoyaniya lesov po dannym kosmicheskoi s'emki (The remote forest monitoring with the use of satellite imagery data), *Geomatika*, 2011, No. 3, pp. 53–58.
4. Mochalov S. A., Global'noe izmenenie klimata i problemy lesnoi ekologii (Global climate change and forest ecology problems), *Izvestiya Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta*, 2002, No. 23, pp. 48–53.
5. Shikhov A. N., Perminov S. I., Kiseleva E. S., Otsenka podverzhennosti boreal'nykh lesov Urala vozdeistviyu lesnykh pozharov i vetrovalov po mnogoletnim ryadam sputnikovykh nablyudenii (Assessment of the boreal forests vulnerability to the fire- and wind-induced disturbances based on long-term series of satellite observations within the Urals region), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2017, Vol. 14, No. 3, pp. 87–102.
6. 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), URL: <http://forestforum.ru/info/pictures/engmap.pdf>.
7. Franklin J. F., Spies T. A., Pelt R. V., Carey A. B., Thornburgh D. A., Berg D. R., Lindenmayer D. B., Harmon M. E., Keeton W. S., Shaw D. C., Bible K., Chen J., Disturbances and structural development of natural forest ecosystems with silvicultural implications, using Douglas-fir forests as an example, *Forest Ecology and Management*, 2002, Vol. 155, pp. 399–423.
8. Gardiner B., Blennow K., Carnus J.-M., Fleischer P., Ingemarson F., Landmann G., Lindner M., Marzano M., Nicoll B., Orazio C., Peyron J.-L., Reviron M.-P., Schelhaas M.-J., Schuck A., Spielmann M., Usbeck T., *Destructive Storms in European Forests: Past and Forthcoming Impacts. Final report to European Commission — DG Environment*, European Forest Institute, 2010, 138 p., URL: http://ec.europa.eu/environment/forests/pdf/STORMS%20Final_Report.pdf (2010).
9. Gregow H., Laaksonen A., Alpe M. E., Increasing large scale windstorm damage in Western, Central and Northern European forests, 1951–2010, *Scientific Reports*, 2017, Vol. 7, Art. No. 46397.
10. 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., Town-

- shend J. R. G., High-Resolution Global Maps of 21st-Century Forest Cover Change, *Science*, 2013, Vol. 342, pp. 850–853.
11. 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), Art. No. 105007.
 12. Kukavskaya E. A., Buryak L. V., Shvetsov E. G., Conard S. G., Kalenskaya O. P., The impact of increasing fire frequency on forest transformations in southern Siberia, *Forest Ecology and Management*, 2016, Vol. 382, pp. 225–235.
 13. 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.
 14. Nilsson C., Stjernquist I., Bähring L., Schlyter P., Jönsson A. M., Samuelsson H., Recorded storm damage in Swedish forests 1901–2000, *Forest Ecology and Management*, 2004, Vol. 199(1), pp. 165–173.
 15. Potapov P., Turubanova S., Zhuravleva I., Hansen M., Yaroshenko A., Manisha A., Forest Cover Change within the Russian European North after the Breakdown of Soviet Union (1990–2005), *Intern. J. Forestry Research*, 2012, Art. ID 729614.
 16. 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.
 17. 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.
 18. Seidl R., Schelhaas M. J., Lexer M. J., Unraveling the drivers of intensifying forest disturbance regimes in Europe, *Global Change Biology*, 2011, Vol. 17(9), pp. 2842–2852.
 19. Seidl R., Thom D., Kautz M., Martin-Benito D., Peltoniemi M., Vacchiano G., Wild J., Ascoli D., Petr M., Honkaniemi J., Lexer M. J., Trotsiuk V., Mairota P., Svoboda M., Fabrika M., Nagel T. A., Reyher C. P. O., Forest disturbances under climate change, *Nature Climate Change*, 2017, Vol. 7 (6), pp. 395–402.
 20. Shikhov A. N., Chernokulsky A. V., A satellite-derived climatology of unreported tornadoes in forested regions of northeast Europe, *Remote Sensing of Environment*, 2018, Vol. 204, pp. 553–567.
 21. Usbeck T., Wohlgemuth T., Dobbertin M., Pfister C., Bürgi A., Rebetez M., Increasing storm damage to forests in Switzerland from 1858 to 2007, *Agricultural and Forest Meteorology*, 2010, Vol. 150(1), pp. 47–55.