Закономерности повреждения ветровалами лесов европейской территории России и Урала: анализ по спутниковым данным

А. Н. Шихов, Д. А. Дремин

Пермский государственный национальный исследовательский университет Пермь, 614990, Россия E-mail: shikhovan@gmail.com

Ветровалы — одни из значимых видов нарушений лесного покрова бореальной зоны. При этом закономерности, определяющие характер и степень повреждения лесов ветровалами в России, остаются малоизученными. В настоящей работе рассмотрена зависимость повреждения лесов ветровалами от их породного состава и возраста, а также от морфометрических параметров рельефа и близости к свежим вырубкам. Анализ выполнен на основе открытых спутниковых данных и цифровых моделей рельефа на примере 10 крупных ветровалов, произошедших в период 1995—2020 гг. в разных районах европейской территории России и Урала и вызванных разными метеорологическими явлениями (шквалами, смерчами и сильным снегопадом). Установлено, что породный состав и возраст насаждений — ключевые факторы, определяющие их подверженность ветровалам. Наиболее подвержены ветровалам спелые и перестойные темнохвойные леса, в отдельных случаях наибольший ущерб отмечен в спелых и перестойных смешанных лесах либо в сосновых лесах. Доля площади ветровалов во вторичных мелколиственных лесах оказалась в 10-50 раз меньше, за исключением случаев, когда ветровалы были вызваны смерчами. Для наиболее крупных ветровалов, вызванных шквалами, подтверждена статистически значимая зависимость площади повреждения лесов от морфометрических параметров рельефа. Доля площади повреждённых насаждений на наветренных склонах в 3-6 раз выше, чем на подветренных участках. Также выявлено существенное (в 1,5–3 раза) увеличение подверженности ветровалам для участков леса, находящихся на расстоянии менее 150 м от свежих рубок. Выявленные зависимости могут быть основой для оценки подверженности лесов воздействию сильных ветров, однако они не являются универсальными для всех ветровалов.

Ключевые слова: ветровалы, степень повреждения древостоев, породный состав и возраст насаждений, факторы местоположения, цифровые модели рельефа, морфометрические характеристики

Одобрена к печати: 09.04.2021 DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-3-153-168

Введение

Ветровалы, наряду с другими нарушениями лесного покрова, являются одним из основных факторов, формирующих динамику лесных экосистем бореальной зоны (Seidl et al., 2011, 2017; Ulanova, 2000). Ветровалы принято классифицировать на эндемичные и катастрофические (Gardiner et al., 2008). Под эндемичными ветровалами понимают регулярно происходящий вывал или слом отдельных деревьев с низкой устойчивостью под воздействием ветров, характерных для данной местности. В свою очередь, катастрофические ветровалы, связанные с ветрами редкой повторяемости, оказывают разрушительное воздействие на лесные экосистемы и наносят значительный экономический ущерб, в связи с чем привлекают большое внимание научного сообщества (Gardiner et al., 2008; Suvanto et al., 2016).

В странах зарубежной Европы с катастрофическими ветровалами связано 53 % от всех нарушений лесного покрова, вызванных природными факторами (Schelhaas et al., 2003). В лесной зоне европейской территории России (ЕТР) и Урала ущерб от них несколько меньше, однако общая площадь сплошных ветровалов в лесах ЕТР за период 1986–2017 гг. оценена в 296,1 тыс. га (0,19 % от площади лесопокрытой территории). При этом свыше 82 % площади ветровалов вызвано шквалистыми ветрами, около 13 % — смерчами, а с явлениями неконвективной природы (штормовыми ветрами и сильными снегопадами) связано только 4,6 % от общей площади ветровалов (Shikhov et al., 2020).

Помимо метеорологических условий (скорости и порывов ветра, интенсивности осадков), на подверженность лесов ветровалам влияют три группы факторов: характеристики насаждений, факторы местоположения и практика лесопользования (Mitchell, 2013; Seidl et al., 2011; Suvanto et al., 2019). Среди первых наиболее значимы породный состав, высота деревьев, возраст (включая распределение деревьев по возрасту в насаждении), особенности крон и корневой системы, полнота древостоя (Dobbertin, 2002; Hanewinkel et al., 2014; Peltola et al., 1999; Seidl et al., 2011). Ключевыми факторами местоположения становятся рельеф, мощность почвенного профиля, механический состав и влажность почвы (Dobbertin, 2002; Lindemann, Baker, 2002; Schindler et al., 2012), близость открытых пространств и водоёмов (Peltola et al., 1999; Suvanto et al., 2016). Влияние характера лесопользования на подверженность лесов ветровалам существенно как на локальном уровне за счёт появления новых открытых пространств внутри лесного массива при сплошных рубках или прореживания древостоя при выборочных рубках, так и в масштабах крупных регионов (Peltola et al., 1999; Suvanto et al., 2016, 2019).

Количественная оценка перечисленных факторов является основой моделирования подверженности лесов ветровалам. Согласно обзору (Seidl et al., 2011), выделяется два подхода к решению этой задачи. Первый подход основан на построении зависимостей риска возникновения ветровала от вышеперечисленных факторов, рассматриваемых как независимые переменные. В рамках него применяются, в частности, логистическая регрессия (Kramer et al., 2001; Lindemann, Baker, 2002; Suvanto et al., 2016, 2019), деревья решений (Dobbertin, 2002; Kupfer et al., 2008) и методы машинного обучения: классификатор Random Forest и искусственные нейронные сети (Albrecht et al., 2019; Hart et al., 2019). Второй подход основан на использовании механистических моделей деревьев (*анел.* single tree models) для оценки риска для каждого дерева (Gardiner et al., 2008; Peltola et al., 1999). Такие модели физически более обоснованы, однако их применение ограничивается в основном монокультурными и однородными по возрасту насаждениями (плантациями).

В любом случае для моделирования подверженности лесов ветровалам требуется получение детальных пространственных данных о характеристиках лесных насаждений и условиях их произрастания. Так, в работах (Suvanto et al., 2016, 2019) использовались данные инвентаризации лесов в Финляндии с пространственным разрешением 10 м; в работах (Dobbertin, 2002; Schindler et al., 2012) — аналогичные данные для территории Швейцарии и Германии с пространственным разрешением 50 м.

Для территории России получение подобных данных оказывается существенной проблемой. Также недоступна детальная информация о характеристиках почвенного покрова. В связи с этим закономерности повреждения лесов ветровалами остаются малоизученными. Исследования по данному направлению немногочисленны и проводятся либо на основе полевых наблюдений на локальных участках (Алесенков и др., 2006; Петухов, 2016), либо с применением открытых спутниковых данных, карт растительности и цифровых моделей рельефа (Петухов, 2016; Шихов и др., 2020). Исключением можно считать работу (Lässig, Močalov, 2000), в которой на основе данных лесоустройства оценено пространственное распределение ветровалов в зависимости от таксационных характеристик насаждений.

Цель настоящей работы заключается в получении количественной оценки зависимости повреждения лесов ветровалами от породного состава и возраста лесных насаждений, а также от факторов местоположения на основе открытых спутниковых данных. Для этого проанализирован ряд крупных ветровалов, произошедших в регионах с существенно различающимися физико-географическими условиями и вызванных различными метеорологическими явлениями.

Данные и методы

Исходные данные и выборка случаев ветровалов

Информационной основой исследования является база данных ветровалов в лесной зоне ETP за 1986–2017 гг. (Shikhov et al., 2020). Контуры ветровалов в базе данных выделены по спутниковым снимкам Landsat, продуктам Global Forest Change (GFC) (Hansen et al., 2013) и Eastern-Europe Forest Cover Change (EEFCC) (Potapov et al., 2015) с пространственным разрешением 30 м. Для актуализации данных используются снимки со спутников Sentinel-2 с пространственным разрешением 10 и 20 м.

Всего для анализа были выбраны 10 крупных ветровалов, семь из которых вызваны шквалами, два — смерчами и один — сильным летним снегопадом (*рис. 1, табл. 1*). Выборка включает крупнейшие ветровалы площадью свыше 5 тыс. га или их участки (если ветровал не покрывается одним снимком Landsat). Также в неё включены два крупнейших смерчевых ветровала 2008 и 2012 гг., площадь которых превышала 1000 га. Помимо площади ветровалов, при формировании выборки учитывалось их расположение в регионах с различными лесорастительными условиями (подзоны средней, южной тайги и подтаежная зона). Два ветровала расположены в горах Северного и Среднего Урала с абсолютными высотами 300–750 м, остальные — на равнинной территории.



Рис. 1. Пространственное расположение анализируемых случаев ветровалов

Отметим, что один из рассмотренных ветровалов, произошедший в районе Висимского заповедника 6 июня 1995 г. (Алесенков и др., 2006), не включён в базу данных, так как расположен к востоку от Уральского хребта. Он был выделен по снимкам Landsat-5-TM, полученным 02.06.1995 и 05.08.1995, в соответствии с известной методикой на основе разности индекса SWVI (*англ.* Short Wave Vegetation Index — коротковолновый вегетационный индекс) (Крылов, Владимирова, 2011).

Для каждого случая ветровала были получены последние предшествующие ветровалу безоблачные снимки со спутников серии Landsat за период с конца мая по август, полностью покрывающие анализируемые участки. Дополнительно для участка ветровала, произошедшего 18.07.2012 на Северном Урале (область выделена на *рис. 1*), взяты снимки сверхвысокого пространственного разрешения с сервиса ArcGIS Imagery, которые использовались для оценки степени повреждения древостоя.

Для анализа факторов местоположения получены цифровые модели рельефа (ЦМР) или цифровые модели поверхности (ЦМП) из нескольких источников:

- ЦМР с размером ячейки 30 м, построенная по данным цифровой топографической карты масштаба 1:100 000 только для ветровалов на территории Пермского края;
- ЦМР SRTM-90 с шагом сетки 3" (https://srtm.csi.cgiar.org/) для ветровалов, расположенных за пределами Пермского края, но южнее 60° с. ш.;
- ЦМП ALOS World Topographic Data (https://www.eorc.jaxa.jp/ALOS/en/aw3d30/index. htm) для ветровалов, расположенных севернее 60° с. ш.

Оценка влияния свежих вырубок и других нарушений лесного покрова, которые произошли в периоды, предшествующие ветровалам, выполнена по данным GFC (Hansen et al., 2013).

Классификация насаждений по преобладающим породам и возрастным группам

Предварительно для каждого рассматриваемого ветровала (или участка ветровала) была выделена область, подвергшаяся его воздействию, — минимальный ограничивающий полигон, описанный вокруг ветровала (*рис. 2a*, см. с. 157). Весь дальнейший анализ проводился в пределах данного полигона. Первым этапом работы была классификация лесных насаждений по преобладающим породам на основе последнего предшествующего ветровалу безоблачного снимка со спутников серии Landsat (сенсоров TM (*англ*. Thematic Mapper), ETM+ (*англ*. Enhanced Thematic Mapper Plus) или OLI (*англ*. Operational Land Imager)), полученного в течение вегетационного периода. Классификация выполнена с применением обучаемого алгоритма Random Forest Classifier, высокая эффективность которого была показана, в частности, в работе (Rodriguez-Galiano et al., 2012). Для классификации были подготовлены изображения, включающие три наиболее информативных спектральных канала: красный, ближний инфракрасный (ИК) и средний ИК (Гаврилюк, Ершов, 2012). Подготовка обучающих выборок реализована в программном пакете ArcGIS 10.*, а классификация — в пакете ESA SNAP 7.0.

Обучающие выборки сформированы на основе известных спектральных характеристик основных лесообразующих пород (см., например, работу (Hovi et al., 2017)). Для уточнения состава классов использована карта растительности России, полученная по данным низкого пространственного разрешения MODIS (*англ*. Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) (Барталев и др., 2011, 2016), и снимки сверхвысокого пространственного разрешения сервиса Google Планета Земля (*англ*. Google Earth). Обучающая выборка корректировалась по факту применения процедуры классификации и экспертной оценки полученных результатов. Легенды классификации для анализируемых участков имеют существенные различия, что связано с особенностями породного состава и возрастной структуры лесов. Общим принципом было выделение классов по преобладающей породе в древостое (темнохвойные, сосновые, смешанные леса с преобладанием лиственных и с преобладанием хвойных, мелколиственные леса).

Для полученных результатов классификации была реализована процедура постобработки с целью выделения двух классов насаждений по возрасту: молодняков (возраст 30–40 лет и менее) и спелых и перестойных насаждений. Возможности более детальной оценки возраста ограничены отсутствием требуемых данных. Необходимость выделения молодняков обусловлена тем, что они обычно мало подвержены ветровалам (Петухов, 2016; Ulanova, 2000). По данным GFC (Hansen et al., 2013) и EEFCC (Potapov et al., 2015) были выделены все сравнительно крупные (>3 га) нарушения лесного покрова, произошедшие за период с 1986 г. до года, когда произошёл ветровал. Все лесопокрытые участки, попадающие в эти области, были классифицированы как молодняки (с преобладанием лиственных или хвойных пород). Также для каждого участка были получены наиболее ранние в ряду наблюдений зимние безоблачные снимки Landsat-TM (для разных участков за 1985–1987 гг.), по которым проводилось маскирование лесопокрытых территорий. Все участки, которые в 1985–1987 гг. ещё были не покрыты лесом, а по снимку, полученному перед ветровалом, классифицировались как лесопокрытые территории, также были отнесены к молоднякам.



Рис. 2. Результаты классификации породного состава и возрастной структуры лесов, подвергшихся воздействию ветровала, на примере события 08.07.2020: *а* — исходный снимок Landsat-8; *б* — увеличенный фрагмент классифицированного изображения

В группу молодняков попадают леса, восстанавливающиеся на вырубках и гарях, а также на неиспользуемых сельскохозяйственных угодьях. Учитывая неопределённость при оценке возраста насаждений по спутниковым данным, все смешанные и темнохвойные леса, не попавшие в группу молодняков, классифицировались как спелые и перестойные. Пример полученного результата классификации после постобработки приведён на *puc. 2*.

Оценку точности проведённой классификации по стандартной схеме (см., например, статью (Денисова и др., 2019)) не удалось выполнить по причине отсутствия материалов лесной таксации или иных проверочных данных на повреждённые ветровалами участки. Для получения общего представления о степени неопределённости классификации рассмотрены значения метрики Precision, известной также как точность пользователя (Лабинцев, 2017). Она рассчитывается в пакете SNAP непосредственно в процессе классификации на основе степени совпадения её результатов с обучающими данными. В большинстве случаев значения метрики Precision для рассматриваемых классов превышали 0,85, что указывает на высокую надёжность результатов классификации. Исключением стал ветровал № 5 (см. *рис. 1*), где из-за наличия на снимке участков с дымкой были выделены по два класса для каждого типа насаждений (для участков с дымкой и без дымки), которые были объединены в ходе постобработки. В среднем по всем результатам классификации, за исключением ветровала № 5, максимальное значение метрики Ассигасу получено для мелколиственных лесов (0,91), а минимальное — для сосновых незаболоченных лесов (0,82). Последнее обусловлено частичным перекрытием данного класса с темнохвойными лесами.

Анализ морфометрических характеристик рельефа

Согласно данным работ (Lässig, Močalov, 2000; Suvanto et al., 2016; Ulanova, 2000), породный состав и возраст насаждений оказываются ведущими факторами, определяющими подверженность лесов ветровалам. Влияние прочих факторов оценивалось отдельно для каждого класса насаждений. Так, для оценки влияния рельефа на характер и степень повреждения древостоя рассчитан ряд морфометрических характеристик, а именно индекс наветренного и подветренного склона (*англ*. Windward/Leeward Index) и параметр выпуклости (*англ*. convexity). Также выполнены классификации форм рельефа по индексу TPI (*англ*. Topographic Position Index) и по схеме из публикации (Iwahashi, Pike, 2006). Все расчёты выполнены средствами геоинформационной системы (ГИС) SAGA (http://www.saga-gis.org/).

Индекс наветренного и подветренного склона (Windward/Leeward Index) представляет собой коэффициент усиления или ослабления ветра, рассчитываемый по ЦМР и заданному направлению ветра (Boehner, Antonic, 2009). Направление ветра при расчёте было задано аналогичным направлению движения шторма. Статистически значимая зависимость повреждения лесов ветровалами от значений этого индекса была показана, в частности, в работе (Shikhov et al., 2019).

Выпуклость склона (convexity) рассчитывается как дополнительный выходной слой при классификации форм рельефа по схеме (Iwahashi, Pike, 2006). Большая подверженность выпуклых склонов ветровалам в сравнении с вогнутыми склонами была показана, в частности, в исследованиях (Hanewinkel et al., 2014; Klaus et al., 2011).



Рис. 3. Ветровалы, выделенные по данным GFC и по снимкам сверхвысокого пространственного разрешения, с оценкой степени повреждения древостоя

Влияние соседства со свежими вырубками (англ. new open area proximity) на подверженность лесов ветровалам показано в работах (Suvanto et al., 2016, 2019). В настоящей работе для анализа этого фактора рассчитано отношение доли площади ветровалов к общей площади лесов на всей пострадавшей территории и в пределах буферных зон, построенных вокруг сравнительно крупных (площадью ≥ 3 га) свежих вырубок (возрастом до 10 лет). Ширина буферной зоны принята равной 5 пикселям снимка Landsat (150 м), что несколько больше, чем в работе (Suvanto et al., 2016), по причине более низкого пространственного разрешения исходной информации.

Оценка степени повреждения древостоя выполнена для ветровала, произошедшего 18.07.2012 на Северном Урале (область выделена на *puc. 1*) на основе визуального анализа снимков сверхвысокого пространственного разрешения с сервиса ArcGIS Imagery (*puc. 3*, см. с. 158). Контуры ветровала были оцифрованы по снимку с выделением двух степеней повреждения древостоя: сплошного (повалено или сломано свыше 90 % деревьев) и частичного (повалено или сломано свыше 90 % деревьев) и частичного (повалено или сломано 30–90 % деревьев). Последующий расчёт зависимости доли повреждённых насаждений от характеристик рельефа был проведён как для всей площади ветровала (выделенной по данным GFC), так и отдельно для участков со сплошным и частичным повреждением древостоя.

Результаты и их обсуждение

Основные характеристики рассматриваемых случаев ветровалов, а также породного состава и возраста повреждённых насаждений приведены в *табл. 1–2*. Все пострадавшие участки до ветровала имели долю лесопокрытой площади свыше 70 % что, впрочем, близко к средним значениям по данной территории.

Номер ветровала	Дата ветровала	Геометрические характеристики (весь трек / анализируемый участок)			Доля лесо- покрытой	Отношение площади наруше- ний лесного покрова по дан-
на <i>рис</i> . <i>1</i>		Длина, км	Площадь, км ²	Максимальная ширина, км	террито- рии, %	ным GFC за предшествующие ветровалу 10 лет ко всей лесо- покрытой территории, %
1	06.06.1995	161,3/95,7	174,8/166,5	118,2/96,2	85,7	_
2	26.06.2008	23,0/23,0	14,8/14,8	2,7/2,7	96,2	0,8
3	16.06.2009	283,0/91,7	123,9/94,8	43,2/43,2	72,0	1,3
4	12.06.2010	81,9/81,9	4,9/4,9	31,3/31,3	73,3	3,2
5	27.06.2010	533/212	502,3/238,8	69,6/69,6	84,4	1,3
6	29.07.2010	622/146	755,5/366,8	39,8/39,8	77,8	4,6
7	июнь 2012	10,2/10,2	20,0/20,0	1,7/1,7	82,9	1,3
8	18.07.2012	202,1/180	95,4/94,6	50,4/50,4	85,4	5,1
9	18.07.2012	306,2/52,2	101,6/85,0	52,1/52,1	94,0	3,2
10	08.07.2020	265/147,5	56,8/55,3	13,8/13,8	88,6	2,6

Таблица 1. Общая характеристика рассматриваемых случаев ветровалов

Рассматриваемые участки до ветровала отличались разной интенсивностью лесопользования. Наибольшие потери лесов за предшествующие 10 лет отмечались на участке ветровала № 8 на северо-западе Пермского края (см. *табл. 1*). Однако эти потери были обусловлены не только вырубками, но и ещё одним крупным ветровалом, который произошёл 07.06.2009, а также пожарами летом 2010 г. (Shikhov et al., 2019). На остальных участках величина потерь не превышала 4,6 %.

Оценка степени повреждения древостоя на ветровале № 9 по снимкам сверхвысокого пространственного разрешения приведена в *табл. 2*. Совпадение площади ветровалов, выде-

ленных по данным GFC, с участками сплошных ветровалов, выделенных по снимкам сверхвысокого разрешения, составило 76,2 %. Это в целом соответствует ранее опубликованным оценкам точности выделения ветровалов по данным GFC (Shikhov et al., 2020). При этом общая площадь ветровалов по данным GFC более чем вдвое превышает фактически выделенную площадь сплошных ветровалов. Это указывает на то, что по данным GFC выделяются не только сплошные, но и частичные ветровалы со значительной степенью повреждения древостоя (приблизительно от 50 % и выше). Расхождения в основном обусловлены геометрической сложностью контуров ветровала.

Таблица 2. Сопоставление площади ветровалов по данным GFC с оценкой степени повреждения лесов по снимкам сверхвысокого разрешения

Характеристика ветровалов	GFC	Степень повреждения по снимкам сверхвысокого разрешения	
		Сплошной ветровал	Частичный ветровал
Общая площадь, га	8917	4190	5294
Количество участков	1748	833	1746
Совпадающая площадь, га / доля от общей площади, %	4969/55,7	3194/76,2	1765/33,3
Несовпадающая площадь, га / доля от общей площади, %	3948/44,3	996/23,7	3529/66,6

Для оценки влияния породно-возрастного состава лесов оценивалось отношение повреждённой ветровалом площади к общей площади леса данного типа. Процент повреждения ветровалом для разных типов леса различается в десятки раз в зависимости от породного состава и возраста насаждений (*maбл. 3*). Максимальный процент повреждения ветровалом отмечен в темнохвойных лесах, а минимальный — в мелколиственных, восстанавливающихся на вырубках и гарях, что соответствует известным закономерностям (Петухов, 2016; Lässig, Močalov, 2000). Причём для молодых мелколиственных лесов приведённые в таблице значения могут быть завышены, поскольку они формируются за счёт пикселей, попадающих на границы классов.

Номер ветровала на <i>рис. 1</i> и тип вызвав-	Доля основных типов леса (от рассматриваемой территории, %) / площадь ветровалов в них (от площади данного типа леса, %)						
шего его явления	Спелые и перестойные леса			Вторичные леса на вырубках, гарях, сельхозугодьях		Низкорослые заболоченные	
	Темнохвойные	Сосновые	Смешанные	Мелколиственные	Смешанные и хвойные	сосновые леса	
1 (снегопад)	5,2/20,2	2,4/8,3	25,1/8,6	16,8/0,14	35,2/1,8	1,1/9,6	
2 (смерч)	14,4/41,5	_/_	_/_	32,8/9,2	43,7/22,8	5,3/15,4	
3 (шквал)	5,9/10,7	_/_	30,4/9,3	12,7/0,5	17,7/2,7	4,5/7,7	
4 (шквал, смерч)	5,5/16,7	_/_	32,7/17,4	31,9/4,0	3,1/3,8	_/_	
5 (шквал)	1,7/5,4	11,3/3,5	14,0/2,3	26,1/0,7	5,3/0,5	3,5/3,6	
6 (шквал)	5,3/22,6	1,7/14,3	35,4/14,4	15,7/1,2	3,3/1,2	7,0/4,2	
7 (смерч)	13,9/61,7	_/_	32,1/43,2	7,5/1,3	29,4/13,3	_/_	
8 (шквал)	7,8/5,6	9,9/3,4	15,9/4,2	6,2/0,06	21,3/3,4	14,2/2,1	
9 (шквал)	29,2/9,0	_/_	38,3/8,3	3,7/0,27	20,0/3,5	2,7/5,0	
10 (шквал)	24,8/3,3	3,7/19,7	33,6/3,3	1,2/0,03	17,9/0,9	7,4/3,6	

Таблица 3. Доля повреждённых ветровалами насаждений в зависимости от породного состава и возраста

Высокий процент повреждения характерен также для спелых и перестойных смешанных лесов — всего в 1,1–1,5 раза меньше, чем для темнохвойных. В наибольшей степени они пострадали при ветровалах 18.07.2012 в Пермском крае и 08.07.2020 в Архангельской обл., причём в последнем случае это были леса, сформировавшиеся в результате естественного распада ельников (Девятова и др., 2007).

Сосновые леса, произрастающие на заболоченных местообитаниях, получили значительно меньшие повреждения, вероятно из-за меньшей высоты полога. Сухие сосновые леса (боры-беломошники) представлены не на всех рассматриваемых участках. Однако имеющиеся данные позволяют предположить их высокую подверженность ветровалам. Так, при ветровале 08.07.2020 в Архангельской обл. наибольшие повреждения получили сосновые насаждения на террасах долины р. Пинеги. В других случаях доля повреждённых ветровалом сосновых лесов была лишь в 1,5–2,2 раза меньше, чем тот же показатель для темнохвойных лесов.



Рис. 4. Особенности пространственного распределения ветровалов на локальном уровне, обусловленные характеристиками древостоя: *a* — повреждение участка леса в водоохранной зоне вдоль реки; *б* — повреждение участков с повышенной долей хвойных пород; *в* — повреждение участка леса с наветренной стороны от вырубки. Стрелкой показано направление ветра при шквале

Характер повреждения древостоя также различается в зависимости от скорости ветра и метеорологического явления, которым вызван ветровал. Так, смерчевые ветровалы отличаются сравнительно узкой полосой повреждений и полным нарушением лесного покрова (Shikhov, Chernokulsky, 2018). По периферии смерчевого ветровала часто отмечаются фрагментарные повреждения наименее устойчивых насаждений. В результате максимальная ширина ветровала может существенно превышать ширину сплошного повреждения древостоя. Такой эффект отмечен во всех трёх рассматриваемых случаях со смерчами. По причине высокой скорости ветра при смерчах существенно повреждаются не только спелые и перестойные леса, но и молодняки.

Для ветровалов, вызванных шквалами, характерен в целом меньший процент повреждения древостоя, мелколиственные леса возрастом до 30–40 лет имеют минимальную степень повреждения (см. *maбл. 3*). В смешанных лесах основной ущерб приурочен к участкам с повышенной долей хвойных пород, также существенно повреждаются участки спелого и перестойного леса в водоохранных зонах (*puc. 4*, см. с. 161). Последнее иногда приводит к увеличению степени повреждения древостоя в пониженных формах рельефа. Однако в целом более подверженными ветровалам считаются возвышенные участки (Петухов, 2016).

Влияние факторов местоположения на подверженность лесов ветровалам

Оценка зависимости повреждения лесов ветровалами от характеристик рельефа выполнена для наиболее подверженных ветровалам спелых и перестойных темнохвойных и смешанных лесов (*maбл. 4*). Проанализировано влияние двух морфометрических параметров: индекса наветренного и подветренного склона (Windward/Leeward Index) и выпуклости (convexity). Для оценки зависимости производилось разбиение соответствующих переменных на интервалы значений (Windward/Leeward Index — с шагом 0,025; convexity — с шагом 0,03) и последующий расчёт процента повреждённых ветровалом насаждений в пределах каждого интервала. Далее оценивалась значимость коэффициентов ранговой корреляции Спирмена между значениями морфометрических параметров и процентом повреждённых ветровалом насаждений в сливных ветровалом насаждений в каждом типе леса. Для ветровала № 9 расчёт выполнен также отдельно для участков с полным и частичным повреждением древостоя, выделенных по снимкам сверхвысокого разрешения.

Номер ветровала на <i>рис. 1</i> и тип вызвавшего его явления		Коэффициенты корреляции Спирмена между долей (в %) площади ветровала в данном типе леса и морфометрической характеристикой					
		Windward/Lo	eeward Index	Convexity			
		Темнохвойный лес	Смешанный лес	Темнохвойный лес	Смешанный лес		
1 (снегопад)		0,92	0,81	-0,99	-0,82		
2 (смерч)		0,17	0,60	-0,96	-0,78		
3 (шквал)		0,52	0,79	0,07	0,69		
4 (шквал, смерч)		-0,36	-0,22	0,81	0,76		
5 (шквал)		0,98	0,96	0,97	0,95		
6 (шквал)		-0,78	0,29	0,93	0,93		
7 (смерч)		-0,56	0,28	-0,52	-0,81		
8 (шквал)		-0,11	-0,16	-0,47	-0,49		
9 (шквал)	данные GFC	0,17	0,23	0,40	0,66		
	сплошной ветровал	0,96	0,93	0,43	0,77		
	частичный ветровал	0,57	-0,94	-0,11	0,42		
10 (шквал)		-0,39	0,33	-0,86	0,76		

Таблица 4. Зависимость доли (в %) площади лесов, пострадавших от ветровала, от морфометрических параметров рельефа Windward/Leeward Index и convexity

Примечание: Полужирным начертанием выделены статистически значимые коэффициенты корреляции при уровне значимости 0,05.

В целом устойчивой (статистически значимой для большинства ветровалов) зависимости площади повреждений лесов ветровалами от обоих рассмотренных морфометрических параметров не выявлено. Однако если исключить ветровалы № 2, 4 и 7, вызванные смерчами, то статистически значимая корреляция со значениями Windward/Leeward Index выражена в большинстве случаев. В частности, она проявляется для ветровалов № 1 и 9, произошедших в горной местности (для ветровала № 9 — только для участков со сплошным повреждением древостоя). Также стоит выделить наличие этой зависимости для наиболее крупных ветровалов № 5 и 6, у которых она может считаться наиболее устойчивой по причине большой площади повреждённых насаждений. Так, на рассматриваемом участке ветровала № 5 доля площади повреждённых насаждений на наветренных склонах оказалась в 3–6 раз выше, чем на подветренных склонах (*puc. 5*).



Рис. 5. Зависимость доли (в %) площади сплошных ветровалов в темнохвойных (*a*) и смешанных (б) лесах от значений индекса наветренного и подветренного склона для ветровала № 5

Однако в некоторых случаях возможна и обратная зависимость, когда ветровалам больше подвержены участки леса в отрицательных формах рельефа. Так, при ветровале 08.07.2020 в Архангельской обл. (ветровал № 10 на *puc. 1*) наибольшие повреждения получили леса в долине р. Пинеги, а не на наветренных склонах, что обусловило отрицательную корреляцию со значениями Windward/Leeward Index. Аналогичная отрицательная корреляция возможна в случаях, когда ветровалами повреждаются большие площади лесов в водоохранных зонах рек.

Номер ветровала на <i>рис. 1</i> и тип	Доля площади ветровала от общей площади внутри буферной зоны вокруг свежих вырубок (числитель) и по всей территории (знаменатель)				
вызвавшего его явления	Темнохвойные леса	Смешанные леса	Сосновые леса (в том числе заболоченные)		
3 (шквал)	14,4/10,7	16,2/9,2	12,2/7,7		
5 (шквал)	13,3/5,4	6,8/2,3	8,9/3,5		
6 (шквал)	33,0/22,6	21,4/14,4	14,3/6,2		
8 (шквал)	7,3/5,6	7,6/4,2	7,7/3,4		
9 (шквал)	10,6/9,0	5,0/5,7	3,4/5,0		
10 (шквал)	6,0/3,3	5,7/3,3	5,8/19,6		

Таблица 5. Зависимость доли (в %) площади лесов, повреждённых ветровалами, от близости к свежим вырубкам и другим нарушениям лесного покрова

Влияние выпуклости склонов (convexity) на площадь ветровалов в целом оказалось схожим с влиянием Windward/Leeward Index. Исключением является ветровал № 1, поскольку в данном случае наибольшие повреждения от ветра получили леса в нижней части склонов гор, а вблизи вершин (на выпуклых участках) степень повреждения была меньше, вероятно по причине адаптированности древостоя к сильным ветрам (Алесенков и др., 2006). Для смерчевых ветровалов оба параметра малоинформативны, в основном по причине непостоянного направления ветра в смерче. Зависимость площади ветровалов от близости к свежим вырубкам оценивалась только для ветровалов, вызванных шквалами (*табл. 5*). Ветровалы, вызванные смерчами, имеют недостаточную площадь для получения подобных оценок, а для ветровала № 1 расчёт не проводился в связи с отсутствием данных GFC.

В большинстве случаев участки, примыкающие к свежим вырубкам (находящиеся на расстоянии ≤150 м от них), оказались в 1,5–3 раза более подвержены ветровалам, чем повреждённые лесные массивы в целом. Причём данная зависимость хорошо выражена для ветровалов № 5 и 6, занимающих наибольшую площадь, где количество свежих вырубок превышало 1 тыс. на каждом из участков. Таким образом, увеличение подверженности ветровалам для участков леса, примыкающих к свежим вырубкам, можно считать устойчивой закономерностью. Ранее подобная зависимость была выявлена для территории Финляндии (Suvanto et al., 2016, 2019). Однако для ветровалов № 9 и 10 данная зависимость либо не выражена, либо проявляется не для всех типов леса.

Заключение

Проведённое исследование позволило выявить ряд закономерностей пространственного распределения ветровалов и степени повреждения древостоя на примере 10 крупных событий, вызванных разными метеорологическими явлениями. Подтверждено, что породный состав и возраст насаждений — ключевые факторы, определяющие их подверженность ветровалам. На этом фоне влияние факторов местоположения (из которых рассматривались рельеф и лесозаготовки) оказывается менее значимым и в некоторых случаях разнонаправленным.

В пределах выделенных участков, подвергшихся воздействию штормовых ветров, доля площади ветровалов в разных типах леса различается в 5-10 раз и более. Наиболее подвержены ветровалам спелые и перестойные темнохвойные леса, что соответствует ранее опубликованным оценкам для территории России (Петухов, 2016; Lässig, Močalov, 2000) и для зарубежной Европы (Dobbertin, 2002; Suvanto et al., 2016). В отдельных случаях наибольший ущерб отмечен в спелых и перестойных смешанных лесах либо в сухих сосновых лесах. Заболоченные сосновые леса, распространённые на многих пострадавших участках, оказались подвержены ветровалам в существенно меньшей степени. Наименее подвержены ветровалам вторичные мелколиственные леса. Существенный ущерб им могут наносить только смерчи или особо сильные шквалы, однако и при смерчевых ветровалах доля повреждённой площади в таких лесах в 4-10 раз меньше, чем в темнохвойных и смешанных лесах.

Зависимость подверженности лесов ветровалам от факторов местоположения в целом неустойчивая. В пределах наиболее крупных ветровалов, вызванных шквалами, доля площади повреждённых насаждений на наветренных склонах в 3–6 раз выше, чем на подветренных участках. Для этих ветровалов имеется статистически значимая зависимость повреждённой площади от значений параметра Windward/Leeward Index. В то же время в ряде случаев корреляция со значениями данного индекса оказалась отрицательной, что может быть связано с большой подверженностью ветровалам лесов, произрастающих в долинах рек. Также подтверждено существенное (в 1,5–3 раза) увеличение доли (в процентах) площади ветровалов на участках леса, находящихся в непосредственной близости от свежих рубок. Однако данная закономерность также выражена не для всех ветровалов.

В целом полученные оценки зависимости подверженности лесов ветровалам от характеристик насаждений и факторов местоположения могут быть основой для моделирования и картографирования риска ветровалов в лесной зоне ЕТР и Урала. Вместе с тем неустойчивость выявленных зависимостей подтверждает большую роль случайных факторов в возникновении ветровалов и сложность их прогнозирования на региональном уровне, что ранее подчёркивалось и другими исследователями (Bouchard et al., 2009).

Исследование выполнено при поддержке гранта Российского фонда фундаментальных исследований № 19-05-00046-а.

Литература

- 1. *Алесенков Ю. М., Мишин А. С., Успин А.А., Якушев А.Б.* Влияние штормовых ветров на леса заповедников Урала // Экологические исследования в Висимском биосферном заповеднике: материалы конф. Екатеринбург, 2006. С. 41–47.
- 2. Барталев С.А., Егоров В.А., Ершов Д.В., Исаев А.С., Лупян Е.А., Плотников Д.Е., Уваров И.А. Спутниковое картографирование растительного покрова России по данным спектрорадиометра MODIS // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2011. Т. 8. № 4. С. 285–302.
- 3. *Барталев С.А., Егоров В.А., Жарко В.О., Лупян Е.А., Плотников Д.Е., Хвостиков С.А., Шабанов Н.В.* Спутниковое картографирование растительного покрова России. М.: ИКИ РАН, 2016. 208 с.
- 4. *Гаврилюк Е.А., Ершов Д.В.* Методика совместной обработки разносезонных изображений Landsat-TM и создания на их основе карты наземных экосистем Московской области // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2012. Т. 9. № 4. С. 15–23.
- 5. *Девятова Н. В., Ершов Д. В., Лямцев Н. И., Денисов Б. С.* Определение масштабов усыхания хвойных лесов Европейского севера России по данным спутниковых наблюдений // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2007. Т. 4. № 2. С. 204–211.
- 6. Денисова А.Ю., Кавеленова Л.М., Корчиков Е.С. Прохорова Н.В., Терентьева Д.А., Федосеев В.А. Пространственная классификация преобладающих древесных пород на территории Самарской области по данным Sentinel-2 и таксации леса // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16. № 4. С. 86–101. DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-4-86-101.
- 7. *Крылов А. М., Владимирова Н.А.* Дистанционный мониторинг состояния лесов по данным космической съемки // Геоматика. 2011. № 3. С. 53–58.
- 8. *Лабинцев Е*. Метрики в задачах машинного обучения // Хабр. 12.05.2017. URL: https://habr.com/ru/ company/ods/blog/328372/ (дата обращения: 31.03.2021).
- 9. *Петухов И. Н.* Роль массовых ветровалов в формировании лесного покрова в подзоне южной тайги (Костромская область): дис. ... канд. биол. наук. Кострома, 2016. 150 с.
- 10. Шихов А. Н., Абдуллин Р. К., Семакина А. В. Картографирование подверженности лесов гибели от пожаров и ветровалов (на примере территории Урала) // Геодезия и картография. 2020. № 4. С. 19–30.
- 11. *Albrecht A. T., Jung C., Schindler D.* Improving empirical storm damage models by coupling with high-resolution gust speed data // Agricultural and Forest Meteorology. 2019. V. 268. P. 23–31.
- Boehner J., Antonic O. Land-surface parameters specific to topo-climatology // Geomorphometry Concepts, Software, Applications. Developments in Soil Science / eds. Hengl T., Reuter H. 2009. V. 33. P. 195–226.
- 13. *Bouchard M., Pothier D., Ruel J.-C.* Stand-replacing windthrow in the boreal forests of eastern Quebec // Canadian J. Forest Research. 2009. V. 39(2). P. 481–487.
- 14. *Dobbertin M*. Influence of stand structure and site factors on wind damage comparing the storms Vivian and Lothar // Forest Snow and Landscape Research. 2002. V. 77(1–2). P. 187–205.
- 15. *Gardiner B., Byrne K., Hale S., Kamimura K., Mitchell S.J., Peltola H., Ruel J-C.* A review of mechanistic modelling of wind damage risk to forests // Forestry. 2008. V. 81(3). P. 447–463.
- 16. Hanewinkel M., Kuhn T., Bugmann H., Lanz A., Brang P. Vulnerability of uneven-aged forests to storm damage // Forestry. 2014. V. 87. P. 525–534.
- 17. 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.
- 18. *Hart E., Sim K., Kamimura K., Meredieu C., Guyon D., Gardiner B.* Use of machine learning techniques to model wind damage to forests // Agricultural and Forest Meteorology. 2019. V. 265. P. 16–29.
- Hovi A., Raitio P., Rautiainen M. A spectral analysis of 25 boreal tree species // Silva Fennica. 2017. V. 51(4). Art. No. 7753.
- 20. *Iwahashi J.*, *Pike R*. Automated classifications of topography from DEMs by an unsupervised nested-means algorithm and a three-part geometric signature // Geomorphology. 2006. V. 86. P. 409–440.
- 21. *Klaus M., Holsten A., Hostert P., Kropp J.* Integrated methodology to assess windthrow impacts on forest stands under climate change // Forest Ecology and Management. 2011. V. 261. P. 1799–1810.
- 22. *Kramer M. G., Hansen A.J., Taper M. L. Kissinger E.J.* Abiotic controls on long-term windthrow disturbance and temperate rain forest dynamics in southeast Alaska // Ecology. 2001. V. 82(10). P. 2749–2768.
- 23. *Kupfer J.A., Myers A.T., McLane S.E., Melton G.N.* Patterns of forest damage in a southern Mississippi landscape caused by Hurricane Katrina // Ecosystems. 2008. V. 11(1). P. 45–60.
- 24. Lässig R., Močalov 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.

- 25. *Lindemann J. D., Baker W. L.* Using GIS to analyse a severe forest blowdown in the Southern Rocky Mountains // Intern. J. Geographical Information Science. 2002. V. 16(4). P. 377–399.
- 26. Mitchell S.J. Wind as a natural disturbance agent in forests: a synthesis // Forestry. 2013. V. 6. P. 147–157.
- 27. *Peltola H., Kellomäki S., Väisänen H., Ikonen V. P.* A mechanistic model for assessing the risk of wind and snow damage to single trees and stands of Scots pine, Norway spruce, and birch // Canadian J. Forest Research. 1999. V. 29(6). P. 647–661.
- 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.
- 29. *Rodriguez-Galiano V.F., Ghimire B., Rogan J., Chica-Olmo M., Rigol-Sanchez J.P.* An assessment of the effectiveness of a random forest classifier for land-cover classification // ISPRS J. Photogrammetry and Remote Sensing. 2012. V. 67(1). P. 93–104.
- 30. *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. P. 1620–1633.
- Schindler D., Grebhan K., Albrecht A., Schönborn J., Kohnle U. GIS-based estimation of the winter storm damage probability in forests: a case study from Baden-Wuerttemberg (Southwest Germany) // Intern. J. Biometeorology. 2012. V. 56. P. 57–69.
- Seidl R., Fernandes P. M., Fonseca T. F., Gillet F., Jönsson A. M., Merganičová K., Netherer S., Arpaci A., Bontemps J.-D., Bugmann H., González-Olabarria J. R., Lasch P., Meredieu C., Moreira F., Schelhaas M.-J., Mohren F. Modelling natural disturbances in forest ecosystems: A review // Ecological Modelling. 2011. V. 22(4). P. 903–924.
- 33. 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., Reyer C.P.O. Forest disturbances under climate change // Nature Climate Change. 2017. V. 7. P. 395–402.
- 34. *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.
- 35. *Shikhov A. N., Perminova E. S., Perminov S. I.* Satellite-based analysis of the spatial patterns of fire and storm-related forest disturbances in the Ural region, Russia // Natural Hazards. 2019. V. 97(1). P. 283–308.
- 36. *Shikhov A. N., Chernokulsky A. V., Azhigov I. O., Semakina A. V.* A satellite-derived database for stand-replacing windthrow events in boreal forests of European Russia in 1986–2017 // Earth System Science Data. 2020. V. 12. P. 3489–3513.
- Suvanto S., Henttonen H. M., Nöjd P., Mäkinen H. Forest susceptibility to storm damage is affected by similar factors regardless of storm type: Comparison of thunder storms and autumn extra-tropical cyclones in Finland // Forest Ecology and Management. 2016. V. 381. P. 17–28.
- 38. Suvanto S., Peltoniemi M., Tuominen S., Strandström M., Lehtonen A. High-resolution mapping of forest vulnerability to wind for disturbance-aware forestry // Forest Ecology and Management. 2019. V. 453. Art. No. 117619.
- 39. *Ulanova N. G.* The effects of windthrow on forests at different spatial scales: a review // Forest Ecology and Management. 2000. V. 135. P. 155–167.

Patterns of wind-induced forest damage in the European Russia and Ural: analysis with satellite data

A. N. Shikhov, D. A. Dremin

Perm State University, Perm 614990, Russia E-mail: shikhovan@gmail.com

Windthrow is one of the most substantial forest disturbance agents of the boreal forest zone. At the same time, the patterns that determine the features and degree of wind-related damage in Russia's forests remain poorly studied. In this study, we consider the relationships of wind-related forest damage with stands species composition and age, and also with the geomorphometric variables and clear-cut proximity. The analysis was performed based on publicly available satellite images and digital elevation models, on the example of 10 large-scale windthrows that occurred in the period 1995–2020 in different parts of the European Russia and Ural, and were caused by various weather events (squalls, tornadoes and heavy snowfall). It is found that forest species composition and age are the most important factors that determine their susceptibility to windthrow. Old-growth dark coniferous forests are most susceptible to windthrow; in some cases, old-growth mixed forests or pine forests were strongly damaged. The percentage of wind-damaged area in re-grown small-leaved forests was 10-50 times less than in old-growth forests, except for tornado-induced windthrow. For large-scale windthrow induced by squall events, a statistically significant relationship of the damaged area with geomorphometric variables is confirmed. Thus, windthrow area on the windward slopes is 3-6 times higher than on the leeward ones. A substantial (1.5-3 times) increase of wind-related damage was also revealed for forests located in close proximity with new logged area. The identified relationships may be used as a basis for windthrow exposure and risk assessment and modeling, but they are not universal for all windthrow events.

Keywords: windthrow, forest damage degree, forest species composition and age, site factors, digital elevation models, geomorphometric variables

Accepted: 09.04.2021 DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-3-153-168

References

- 1. Alesenkov Yu. M., Mishin A. S., Uspin A. A., Yakushev A. B., The impact of storm winds on the forests of the Ural's natural reserves, *Ekologicheskie issledovaniya v Visimskom biosfernom zapovednike*, Ekaterinburg, 2006, pp. 41–47 (in Russian).
- 2. Bartalev S.A., Egorov V.A., Ershov D.V., Isaev A.S., Loupian E.A., Plotnikov D.E., Uvarov I.A., Mapping of Russia's vegetation cover using MODIS satellite spectroradiometer data, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2011, Vol. 8, No. 4, pp. 285–302 (in Russian).
- 3. Bartalev S.A., Egorov V.A., Zharko V.O., Loupian E.A., Plotnikov D.E., Khvostikov S.A., Shabanov N.V., *Land cover mapping over Russia using Earth observation data*, Moscow: Space Research Institute RAS, 2016, 208 p. (in Russian).
- 4. Gavrilyuk E.A., Ershov D.V., Method of combined processing of multi-seasonal Landsat-TM images and creation of the map of terrestrial ecosystems of the Moscow region, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2012, Vol. 9, No. 4, pp. 15–23 (in Russian).
- 5. Devyatova N. V., Ershov D. V., Lyamtsev N. I., Denisov B. S., Determination of the extent of desiccation of coniferous forests in the European North of Russia according to satellite observations, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2007, Vol. 4, No. 2, pp. 204–211 (in Russian).
- Denisova A. Yu., Kavelenova L. M., Korchikov E. S., Prokhorova N. V., Terentyeva D. A., Fedoseev V. A., Tree species classification in Samara Region using Sentinel-2 remote sensing images and forest inventory data, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2019, Vol. 16(4), pp. 86–101 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-4-86-101.
- 7. Krylov A. M., Vladimirova N. A., Remote monitoring of forest health based on satellite imagery data, *Geomatika*, 2011, No. 3, pp. 53–58 (in Russian).
- 8. Labintsev E., Metriki v zadachakh mashinnogo obucheniya (Metrics in Machine Learning Problems), *Habr.com*, 12.05.2017 (in Russian, accessed: 31.03.2021).
- 9. Petukhov I. N., *Rol' massovykh vetrovalov v formirovanii lesnogo pokrova v podzone yuzhnoi taigi (Kostrom-skaya oblast'): Diss. kand. biol. nauk* (The role of massive windthrows in the forest cover formation in the southern taiga subzone (Kostroma region), Cand. biol. sci. thesis), Kostroma, 2016, 150 p. (in Russian).
- 10. Shikhov A. N., Abdullin R. K., Semakina A. V., Mapping forest areas threatened by fires and windthrows (on the example of the Ural territory), *Geodeziya i kartografiya*, 2020, No. 4, pp. 19–30 (in Russian).
- 11. Albrecht A. T., Jung C., Schindler D., Improving empirical storm damage models by coupling with high-resolution gust speed data, *Agricultural and Forest Meteorology*, 2019, Vol. 268, pp. 23–31.
- Boehner J., Antonic O., Land-surface parameters specific to topo-climatology, In: *Geomorphometry Concepts, Software, Applications. Developments in Soil Science*, Hengl T., Reuter H. (eds.), 2009, Vol. 33, pp. 195–226.
- 13. Bouchard M., Pothier D., Ruel J.-C., Stand-replacing windthrow in the boreal forests of eastern Quebec, *Canadian J. Forest Research*, 2009, Vol. 39(2), pp. 481–487.
- 14. Dobbertin M., Influence of stand structure and site factors on wind damage comparing the storms Vivian and Lothar, *Forest Snow and Landscape Research*, 2002, Vol. 77(1–2), pp. 187–205.
- 15. Gardiner B., Byrne K., Hale S., Kamimura K., Mitchell S.J., Peltola H., Ruel J-C., A review of mechanistic modelling of wind damage risk to forests, *Forestry*, 2008, Vol. 81(3), pp. 447–463.
- Hanewinkel M., Kuhn T., Bugmann H., Lanz A., Brang P., Vulnerability of uneven-aged forests to storm damage, *Forestry*, 2014, Vol. 87, pp. 525–534.

- 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.
- 18. Hart E., Sim K., Kamimura K., Meredieu C., Guyon D., Gardiner B., Use of machine learning techniques to model wind damage to forests, *Agricultural and Forest Meteorology*, 2019, Vol. 265, pp. 16–29.
- 19. Hovi A., Raitio P., Rautiainen M., A spectral analysis of 25 boreal tree species, *Silva Fennica*, 2017, Vol. 51(4), Art. No. 7753.
- 20. Iwahashi J., Pike R., Automated classifications of topography from DEMs by an unsupervised nestedmeans algorithm and a three-part geometric signature, *Geomorphology*, 2007, Vol. 86, pp. 409–440.
- 21. Klaus M., Holsten A., Hostert P., Kropp J., Integrated methodology to assess windthrow impacts on forest stands under climate change, *Forest Ecology and Management*, 2011, Vol. 261, pp. 1799–1810.
- 22. Kramer M. G., Hansen A. J., Taper M. L. Kissinger E. J., Abiotic controls on long-term windthrow disturbance and temperate rain forest dynamics in southeast Alaska, *Ecology*, 2001, Vol. 82(10), pp. 2749–2768.
- 23. Kupfer J.A., Myers A.T., McLane S.E., Melton G.N., Patterns of forest damage in a southern Mississippi landscape caused by Hurricane Katrina, *Ecosystems*, 2008, Vol. 11(1), pp. 45–60.
- 24. Lässig R., Močalov 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.
- 25. Lindemann J. D., Baker W. L., Using GIS to analyse a severe forest blowdown in the Southern Rocky Mountains, *Intern. J. Geographical Information Science*, 2002, Vol. 16(4), pp. 377–399.
- 26. Mitchell S.J., Wind as a natural disturbance agent in forests: a synthesis, *Forestry*, 2013, Vol. 86, pp. 147–157.
- 27. Peltola H., Kellomäki S., Väisänen H., Ikonen V. P., A mechanistic model for assessing the risk of wind and snow damage to single trees and stands of Scots pine, Norway spruce, and birch, *Canadian J. Forest Research*, 1999, Vol. 29(6), pp. 647–661.
- 28. 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.
- 29. Rodriguez-Galiano V. F., Ghimire B., Rogan J., Chica-Olmo M., Rigol-Sanchez J. P., An assessment of the effectiveness of a random forest classifier for land-cover classification, *ISPRS J. Photogrammetry and Remote Sensing*, 2012, Vol. 67(1), pp. 93–104.
- 30. 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, pp. 1620–1633.
- 31. Schindler D., Grebhan K., Albrecht A., Schönborn J., Kohnle U., GIS-based estimation of the winter storm damage probability in forests: a case study from Baden-Wuerttemberg (Southwest Germany), *Intern. J. Biometeorology*, 2012, Vol. 56, pp. 57–69.
- Seidl R., Fernandes P. M., Fonseca T. F., Gillet F., Jönsson A.M, Merganičová K., Netherer S., Arpaci A., Bontemps J.-D., Bugmann H., González-Olabarria J. R., Lasch P., Meredieu C., Moreira F., Schelhaas M.-J., Mohren F., Modelling natural disturbances in forest ecosystems: A review, *Ecological Modelling*, 2011, Vol. 22(4), pp. 903–924.
- 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., Reyer, C. P.O., Forest disturbances under climate change, *Nature Climate Change*, 2017, Vol. 7, pp. 395–402.
- 34. 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.
- 35. Shikhov A. N., Perminova E. S., Perminov S. I., Satellite-based analysis of the spatial patterns of fire and storm-related forest disturbances in the Ural region, Russia, *Natural Hazards*, 2019, Vol. 97(1), pp. 283–308.
- 36. Shikhov A. N., Chernokulsky A. V., Azhigov I. O., Semakina A. V., A satellite-derived database for stand-replacing windthrow events in boreal forests of European Russia in 1986–2017, *Earth System Science Data*, 2020, Vol. 12, pp. 3489–3513.
- 37. Suvanto S., Henttonen H. M., Nöjd P., Mäkinen H., Forest susceptibility to storm damage is affected by similar factors regardless of storm type: Comparison of thunder storms and autumn extra-tropical cyclones in Finland, *Forest Ecology and Management*, 2016, Vol. 381, pp. 17–28.
- 38. Suvanto S., Peltoniemi M., Tuominen S., Strandström M., Lehtonen A., High-resolution mapping of forest vulnerability to wind for disturbance-aware forestry, *Forest Ecology and Management*, 2019, Vol. 453, Art. No. 117619.
- 39. Ulanova N.G., The effects of windthrow on forests at different spatial scales: a review, *Forest Ecology and Management*, 2000, Vol. 135, pp. 155–167.