

## Пространственно-временное распределение ветровалов в лесной зоне Западной Сибири в 2001–2020 гг.

А. Н. Шихов<sup>1</sup>, А. В. Чернокульский<sup>2,3</sup>, И. О. Ажигов<sup>1</sup>

<sup>1</sup> *Пермский государственный национальный исследовательский университет  
Пермь, 614990, Россия*

*E-mail: shikhovan@gmail.com*

<sup>2</sup> *Институт физики атмосферы имени А. М. Обухова РАН  
Москва, 119017, Россия*

*E-mail: a.chernokulsky@ifaran.ru*

<sup>3</sup> *Институт географии РАН, Москва, 119017, Россия*

Рассматривается пространственно-временное распределение ветровалов в лесной зоне Западной Сибири за период 2001–2020 гг. Данные о ветровалах получены по спутниковым снимкам Landsat, Sentinel-2, данным проекта Global Forest Change и снимкам высокого пространственного разрешения с открытых картографических сервисов. Для уточнения дат и времени штормовых событий использованы данные сети метеостанций, снимки с метеорологических спутников и сведения об опасных явлениях погоды, наблюдавшихся в данном регионе. Созданная база данных включает 25 774 участка повреждения лесного покрова, которые относятся к 265 различным ветровалам. Эти ветровалы вызваны 158 различными штормовыми событиями. Данные доступны по ссылке <https://doi.org/10.6084/m9.figshare.19582786.v1>. Общая площадь ветровалов составляет 508,3 км<sup>2</sup>, или 0,04 % от лесопокрытой площади, что в четыре раза меньше, чем на европейской территории России (ЕТР) за аналогичный период. Свыше 67 % ветровалов, включённых в базу данных, вызваны смерчами, на них также приходится 25,4 % от общей площади, что значительно больше, чем на ЕТР. На шкваловые ветровалы приходится 30 % случаев и 40 % от общей площади, а на ветровалы, вызванные неконвективными явлениями, — 2,5 % от числа случаев и 34,5 % от общей площади. Максимальная плотность ветровалов выявлена в Кемеровской обл., а также на западе Томской обл. и на юго-востоке Ханты-Мансийского автономного округа. Наибольшее число случаев ветровалов зафиксировано в 2007 и 2010 гг. Смерчи и шквалы, вызывающие ветровалы, чаще всего наблюдаются в июне, а ветровалы, вызванные неконвективными явлениями, отмечались в октябре – ноябре в горах Урала и Кузнецкого Алатау. Выявлено несколько крупных вспышек шквалов и смерчей. Однако по площади повреждения лесов они в 10–15 раз уступают крупнейшим подобным событиям на ЕТР. Площадь ветровалов в Западной Сибири в 77,5 раза меньше площади гарей за этот же период, при этом для ЕТР это соотношение составляет 3,5/1.

**Ключевые слова:** ветровалы, смерчи, шквалы, неконвективные явления, пространственно-временное распределение, Западная Сибирь, спутниковые данные, Landsat, Sentinel-2, Global Forest Change

Одобрена к печати: 26.05.2022

DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-3-186-202

### Введение

Ветровалы — один из видов нарушений лесного покрова природного характера. Они вызываются сильными ветрами конвективной (шквалы, смерчи) или неконвективной природы, часто в сочетании с ливневыми осадками, налипанием мокрого снега или гололёдом. Большинство ветровалов имеют эндемичный характер и представляют собой регулярно повторяющийся процесс вывала или слома отдельных ослабленных деревьев в лесных сообществах (Mitchell, 2013). Особый интерес представляет исследование катастрофических ветровалов, которые вызывают массовый вывал деревьев и полное разрушение древостоя.

Роль ветровалов как фактора, вызывающего нарушения лесного покрова, имеет существенные региональные различия. Она определяется частотой и интенсивностью штормовых событий, породным составом и возрастом лесных насаждений, факторами местополо-

жения (рельефом, влажностью почвы и мощностью почвенного профиля), а также практикой лесопользования (Mitchell, 2013; Seidl et al., 2011; Venäläinen et al., 2020). Так, в Западной, Центральной и Северной Европе ветровалы становятся ведущим природным фактором, вызывающим нарушения лесного покрова. В Западной Европе на ветровалы приходится около 7 % от всех потерь лесов (Senf, Seidl, 2021), или 53 % всех потерь, вызванных природными факторами (Schelhaas et al., 2003). Значительные потери лесов от ветровалов обусловлены влиянием зимних штормов (глубоких внетропических циклонов в холодный период года) и снижаются к востоку по мере ослабления этих штормов (Haylock, 2011). В Восточной Европе с ветровалами связано всего 1,3 % от общей площади потерь лесов за 1985–2012 гг. (Potapov et al., 2015).

На европейской территории России (ЕТР) доля ветровалов в общей площади нарушений лесного покрова в среднем составляет 2,6 %, но достигает 15 % и более на западном склоне Северного Урала (Шихов, 2022). За этот же период в среднем по ЕТР площадь гибели лесов от ветровалов была в 3,5 раза меньше, чем от пожаров, но в ряде регионов ветровалы выступают ведущим природным фактором нарушения лесного покрова (Петухов, 2016; Шихов, 2022). За Уралом роль ветровалов как фактора гибели лесов существенно снижается. Например, площадь гибели лесов от пожаров почти в 30 раз превышает площадь сплошных ветровалов для Уральского региона, при этом на восточном склоне Урала и в Зауралье в период 2000–2014 гг. площадь ветровалов не достигала и 1 % от площади гарей (Shikhov et al., 2019).

Исследования ветровалов в лесах России до настоящего времени также в основном фокусировались на ЕТР (Крылов и др., 2012; Петухов, 2016; Рожков, Козак, 1989; Baumann et al., 2014; Potapov et al., 2015; Ulanova, 2000). Для ЕТР на основе многолетнего ряда спутниковых снимков Landsat, Sentinel-2 и продуктов их обработки была создана база данных ветровалов за период с 1986 по 2017 г. (Shikhov et al., 2020), которая затем была актуализирована до 2020 г. (Чернокульский и др., 2022). Также ряд исследований был проведён в Уральском регионе (Алесенков и др., 1998, 2006; Lassig, Mocalov, 2000).

Для территории Западной Сибири исследования ветровалов имеют единичный характер. Тем не менее ветровалы считаются существенным фактором риска для лесного хозяйства Западной Сибири, а повышению подверженности лесов их воздействию способствует широкое распространение пород с мягкой древесиной, в частности осины (Мельник, Мельник, 2016). По многолетним спутниковым данным более детально исследованы ветровалы в южной части Томской обл. (Dyukarev et al., 2011).

Данные о ветровалах также представляют значительный интерес с точки зрения изучения климатологии вызывающих их шквалов и смерчей (Chernokulsky, Shikhov, 2018; Shikhov, Chernokulsky, 2018; Shikhov et al., 2020). При формировании базы данных случаев смерчей в Северной Евразии (Chernokulsky et al., 2020a) и её актуализации для территории России (Чернокульский и др., 2021) по спутниковым снимкам ветровалов на территории Западной Сибири было выявлено множество ранее неизвестных случаев смерчей с интенсивностью  $\geq F2$  по шкале Фудзита. Также был подтверждён один случай смерча с интенсивностью  $F4$  по шкале Фудзита (Chernokulsky et al., 2020b). В то же время в этих работах не рассматривались ветровалы, вызванные шквалами и ветрами неконвективной природы.

В настоящей работе представлены новые данные о ветровалах в лесной зоне Западной Сибири, полученные на основе снимков со спутников серии Landsat, данных проекта Global Forest Change (GFC) (Hansen et al., 2013), а также снимков Sentinel-2 за период 2001–2020 гг. Проведён анализ их пространственно-временной структуры, выделены случаи наиболее крупных ветровалов.

## Данные и методы

### *Территория исследования и формирование базы данных*

Исследование выполнено в границах субъектов Российской Федерации, относящихся к территории Западной Сибири и Зауралья (рис. 1, см. с. 188). Лесная зона в пределах Западной

Сибири характеризуется значительно меньшей долей лесопокрытой территории, чем на ЕТР, в связи с широким распространением болот. В пределах подзоны северной тайги лесистость местами составляет менее 30 %. Наибольшая доля лесопокрытой территории (>90 %) характерна для востока Томской обл., а также для Северного Зауралья. Преобладающими лесобразующими породами, согласно карте растительности России (Барталев и др., 2016), выступают светлохвойные леса (сосна, лиственница), в южной части — мелколиственные (берёза, осина), а темнохвойные леса шире представлены на восточном склоне Урала и в горах Алтая и Кузнецкого Алатау.

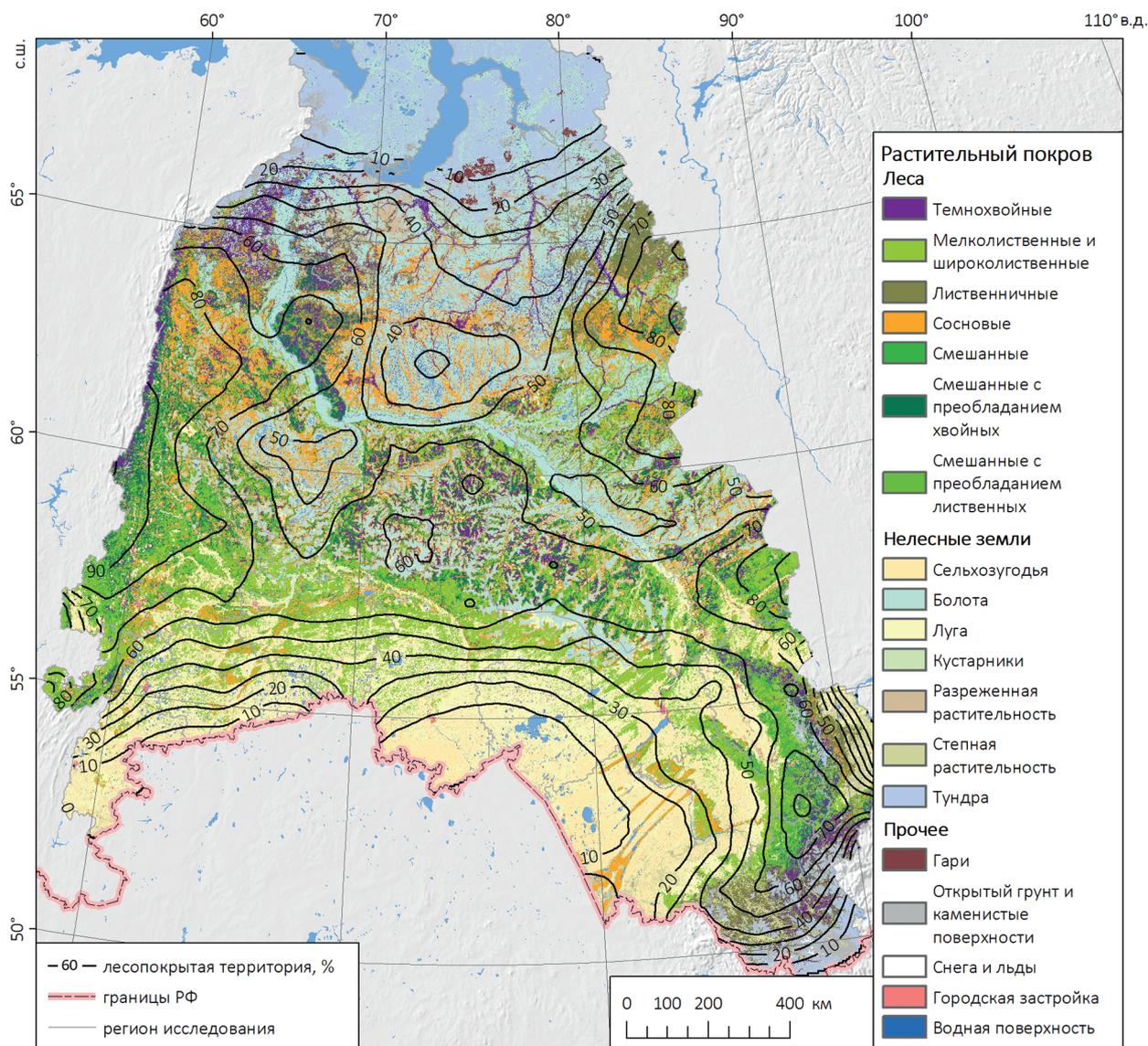


Рис. 1. Типы растительного покрова и лесистость в лесной зоне Западной Сибири на основе карты растительности России (Барталев и др., 2016)

Структура базы данных ветровалов в лесах Западной Сибири аналогична таковой для ЕТР (Шихов, 2022; Shikhov et al., 2020). Она включает три набора данных с одинаковой геометрией, но разным атрибутивным наполнением: элементарные повреждённые участки, которые группируются в ветровалы, которые, в свою очередь, относятся к трекам разных штормовых событий. В качестве трека штормового события рассматривается группа последовательно или параллельно расположенных ветровалов, имеющих одинаковое направление и возникших

в одну дату (или диапазон дат), которые можно связать с прохождением одной мезомасштабной конвективной системы (МКС) или неконвективного шторма. При отнесении ветровалов к одному штормовому событию помимо их взаимного расположения и дат возникновения анализировались также данные метеостанций и сообщения о шквалах и смерчах, опубликованные в СМИ.

Критерии отнесения элементарных участков к одному ветровалу и отнесения ветровалов к одному штормовому событию аналогичны критериям, ранее принятым для ЕТР (Shikhov et al., 2020).

Идентификация ветровалов и определение их характеристик по спутниковым данным выполнены по методике, описанной в работе (Shikhov et al., 2020). Первичный поиск ветровалов производился по данным GFC с использованием снимков Landsat и снимков сверхвысокого пространственного разрешения с открытых картографических сервисов для последующей верификации. Выделение контуров ветровалов выполнено на основе данных GFC либо по снимкам Landsat или Sentinel-2 — вручную для ветровалов небольшой площади или на основе разности нормализованного индекса инфракрасной разности NDII (*англ.* Normalized Difference Infrared Index) (Chernokulsky, Shikhov, 2018) для крупных ветровалов. Возможности использования данных GFC ограничены для южной части Западной Сибири, где широко распространены лиственные леса, площадь ветровалов в которых по этим данным может недооцениваться в 2–3 раза. Некоторые ветровалы в лиственных лесах были оконтурены вручную по снимкам с открытых картографических сервисов. Как и для ЕТР (Shikhov et al., 2020), при идентификации ветровалов исключены элементарные участки площадью менее 0,18 га (два пикселя съёмочной системы Landsat). Также были исключены из рассмотрения смерчевые ветровалы площадью менее 5 га и другие ветровалы площадью менее 25 га. Использование разных критериев минимальной площади для смерчевых и прочих ветровалов обусловлено геометрическими особенностями, которые упрощают идентификацию смерчевых ветровалов по спутниковым снимкам (Shikhov et al., 2020).

Стоит отметить, что в отличие от ЕТР ветровалы в Западной Сибири крайне редко пересекаются с вырубками, что обусловлено сравнительно небольшой площадью лесозаготовок в этом регионе. В то же время ветровальные участки регулярно подвергаются воздействию пожаров, что может приводить к пропуску некоторых ветровалов по данным GFC. В частности, крупные пожары на ветровалах наблюдались в пожароопасный сезон 2010 г. на севере Свердловской обл. и в 2012–2013 гг. в Ханты-Мансийском автономном округе (ХМАО).

Даты (или диапазоны дат) возникновения ветровалов определены на основе серий одновременных снимков Landsat, Sentinel-2, а также дополнительной информации о штормовых событиях, в частности данных наблюдений метеостанций и сообщений в СМИ, согласно методике (Shikhov et al., 2020). Для определения дат ветровалов имеет существенное значение плотность сети метеостанций, которая в Западной Сибири ниже, чем на ЕТР. Среднее расстояние между метеостанциями составляет 57,5 км, однако в средней части лесной зоны (где ветровалы наиболее широко распространены) расстояние между ближайшими метеостанциями достигает 100–140 км, а плотность населения менее 1 чел./км<sup>2</sup>. С другой стороны, более точному определению диапазонов дат по спутниковым снимкам способствует меньшая доля облачных дней в сравнении с таёжной зоной ЕТР (Разуваев и др., 2020). Всего удалось определить дату возникновения для 54,3 % всех ветровалов, что несколько меньше, чем за аналогичный период 2001–2020 гг. для ЕТР (60,3 %). Для смерчевых ветровалов доля случаев с известными датами составляет 47,4 %, а для прочих ветровалов — 68,6 %.

На основе данных GFC за 2001–2020 гг. была оценена роль ветровалов в сравнении с другими факторами нарушения лесного покрова. В частности, рассчитано отношение площади ветровалов к общей площади потерь лесного покрова (вызванной всеми факторами) и соотношение площади гибели лесов от крупных пожаров и ветровалов. Оценка площади потерь лесов от пожаров выполнена по методике, приведённой в работе (Krylov et al., 2014), которая основана на совместном анализе данных GFC и данных о тепловых аномалиях, полученных по снимкам сенсора MODIS (*англ.* Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) (Giglio et al., 2016) спутников Terra/Aqua. С целью уменьшения неопределённости рассматривались

только крупные гари площадью свыше 100 га, так как на них приходится более 95 % всех потерь лесов от пожаров (Shikhov et al., 2019).

### Результаты и их обсуждение

Созданная база данных включает 25 774 элементарных участка, которые относятся к 265 различным ветровалам (рис. 2). В свою очередь, эти ветровалы относятся к 158 штормовым событиям. Общая площадь ветровалов составляет 508,3 км<sup>2</sup>, или 0,04 % от лесопокрытой площади в пределах изучаемого региона (Shikhov et al., 2022). Для сравнения, на ЕТР общая площадь ветровалов за период 2001–2020 гг. оценена в 2485 км<sup>2</sup>, или 0,17 % от площади лесопокрытой территории (Шихов, 2022). Таким образом, в лесной зоне Западной Сибири ветровалы занимают значительно меньшие площади в сравнении с ЕТР, что подтверждает ранее выдвинутые гипотезы (Shikhov et al., 2019).

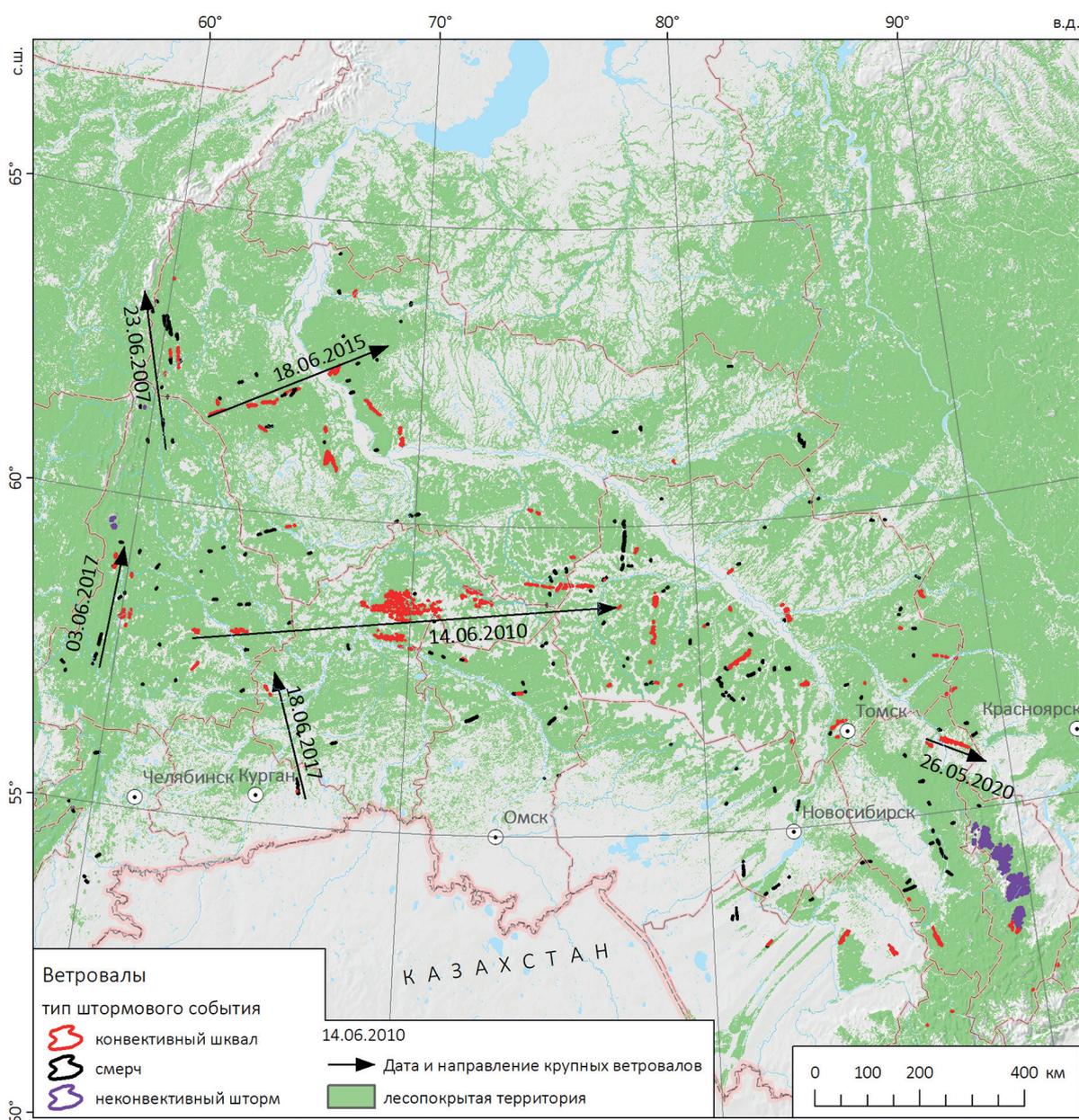


Рис. 2. Пространственное распределение сплошных ветровалов в лесной зоне Западной Сибири за 1986–2020 гг. Лесистость оценена по карте растительности России (Барталев и др., 2016)

Как и на ЕТР, подавляющее большинство (97,5 %) случаев ветровалов в Западной Сибири связано с конвективными явлениями — шквалами (80 случаев) и смерчами (179 случаев). С неконвективными явлениями связано всего шесть случаев ветровалов, но на них приходится 34,5 % от общей площади. Такие ветровалы наблюдались в горной местности — на Северном Урале и в Кузнецком Алатау. В сравнении с ЕТР в Западной Сибири существенно выше доля смерчевых ветровалов и ниже доля ветровалов, вызванных шквалами (табл. 1). Высокая доля случаев смерчевых ветровалов частично обусловлена использованием разных порогов минимальной площади (5 га — для смерчевых ветровалов, 25 га — для прочих ветровалов). Так, если использовать порог 25 га для всех ветровалов, то соотношение числа случаев смерчевых и шкваловых ветровалов будет близко к единице (87/80). Однако соотношение площадей при этом изменится незначительно, поскольку свыше 91 % общей площади смерчевых ветровалов приходится на крупные ( $S \geq 25$  га).

Таблица 1. Распределение ветровалов в лесной зоне Западной Сибири в зависимости от типов вызвавших их метеорологических явлений

Метеорологическое явление, вызвавшее ветровал	Степень достоверности определения	Количество ветровалов	Суммарная площадь, км <sup>2</sup>	Доля ветровалов этого типа от общей площади ветровалов, %	
				в Западной Сибири	на ЕТР
Шквал	Высокая	72	167,0	25,5	13,1
	Средняя	8	36,7		
Смерч	Высокая	160	123,2	40,0	82,1
	Средняя	19	6,2		
Неконвективные явления	Высокая	6	175,2	34,5	4,8
	Средняя	0	0		
Всего	Высокая	238	465,4	100	100
	Средняя	27	42,9		

Ветровалы в полученной базе данных отнесены к 158 различным штормовым событиям, из которых 40 вызвали два ветровала и более. На эти 40 событий приходится 73,8 % от площади всех ветровалов. Среди событий конвективного характера выделяются вспышки шквалов и смерчей 23.06.2007, 14.06.2010 и 18.06.2015, когда отмечалось более 10 ветровалов за сутки, причём в первом случае преобладали смерчи, а во втором и третьем — шквалы. Наиболее значимое событие неконвективного характера — штормовой ветер со снегопадом 08.11.2019 в Кузнецком Алатау, который вызвал сплошные ветровалы на общей площади 16,6 тыс. га.

Для 74 из 265 ветровалов по данным сети метеостанций отмечены порывы ветра  $\geq 15$  м/с. В одном случае (23.06.2007) был зафиксирован ураганный ветер (38 м/с) при прохождении смерча вблизи метеостанции «Бурмантово». Также в шести случаях порывы ветра достигали 25–29 м/с, в 29 случаях — 20–24 м/с. Другие события не сопровождались зафиксированным на метеорологических станциях региона усилением ветра.

### Пространственное распределение ветровалов

Ветровалы встречаются в пределах всей лесной зоны Западной Сибири, однако в северной тайге они очень редки (см. рис. 2). Северная граница распространения ветровалов в Западной Сибири проходит между 63 и 64° с. ш. Это существенно южнее в сравнении с ЕТР (Shikhov et al., 2020) и с Восточной Сибирью, где крупный смерчевый ветровал выявлен вблизи 67° с. ш. (Chernokulsky et al., 2020a). Выделяются два максимума плотности ветровалов: на западе Томской обл. и юго-востоке ХМАО, а также в Кемеровской обл. Это связано со значительной заболоченностью северной тайги Западной Сибири, где доля лесопо-

крытой территории близка к 30 %. Южная граница распространения ветровалов проходит по лесостепной зоне. Здесь выявлен ряд крупных ветровалов, вызванных смерчами в 2006 и 2018 гг. в Новосибирской обл., в 2013 г. в Омской обл., в 2017 г. в Курганской обл., в 2018 г. в Алтайском крае.

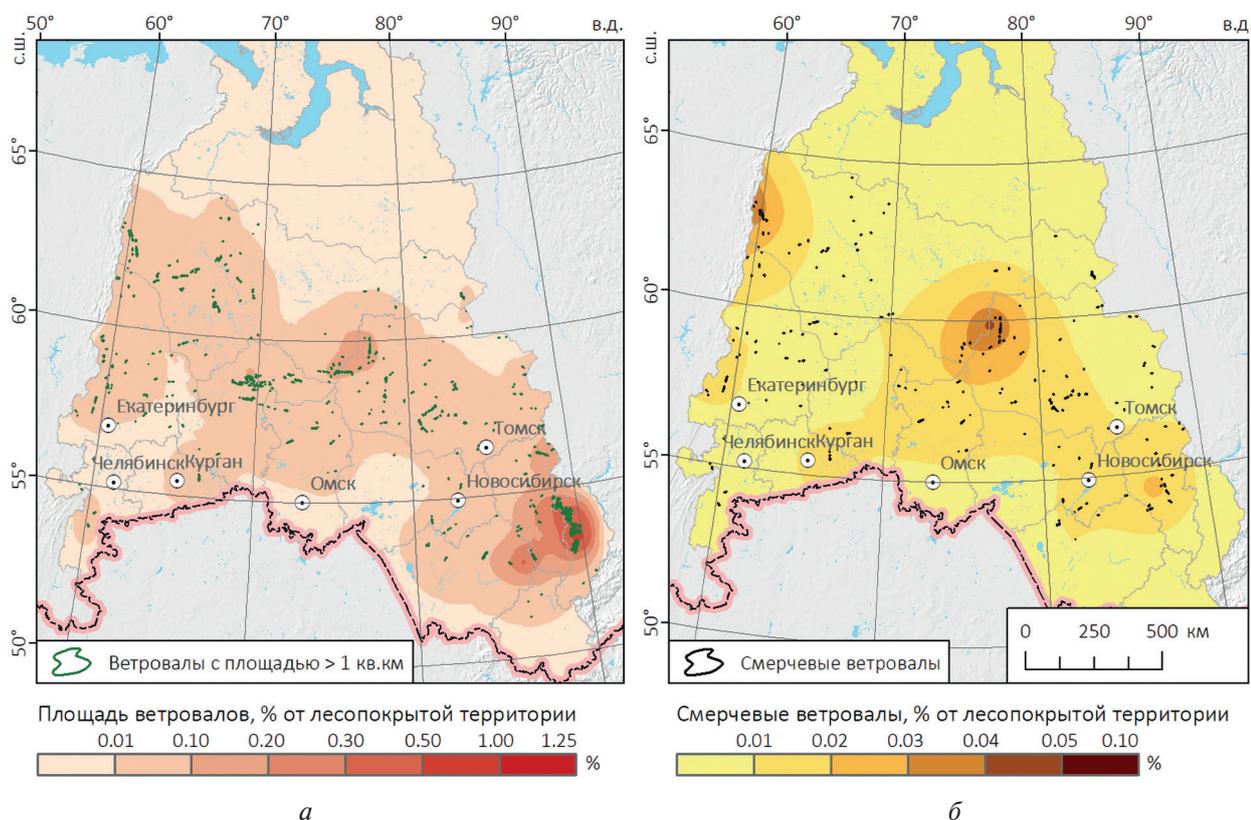


Рис. 3. Отношение площади ветровалов к площади лесопокрытой территории: а — для всех ветровалов; б — для ветровалов, вызванных смерчами

Доля площади ветровалов от общей площади лесов максимальна в Кузнецком Алатау и в Кемеровской обл., где наблюдался ряд крупных ветровалов в 2019–2020 гг. (08.11.2019, 26.05.2020, 01.07.2020). На остальной территории доля площади ветровалов от лесопокрытой территории не превышает 0,1 %, за исключением северо-запада Томской обл. и юго-востока ХМАО (рис. 3а). Высокой повторяемости ветровалов в этой области может способствовать значительная доля лесопокрытой территории (60–80 %), распространение подверженных ветровалам древесных пород, в том числе осины и в меньшей степени темнохвойных, а также высокая влажность почвы. Здесь же находится и максимум плотности смерчевых ветровалов (рис. 3б). Циркуляционные условия, способствующие возникновению шквалов и смерчей в этом районе, требуют дополнительного изучения. В то же время данный максимум может быть эффектом ограниченной по времени выборки.

### **Роль ветровалов в сравнении с другими факторами нарушений лесного покрова**

На ветровалы приходится чуть более 1 % от всей площади гибели лесов на территории Западной Сибири за 2001–2020 гг. (рис. 4а), что в 2,6 раза меньше, чем на ЕТР. На большей части региона вклад ветровалов в общую площадь нарушений лесного покрова составляет менее 1 %. Исключением стали Кемеровская обл., южная часть Томской обл., восток Тюменской обл., а также восточный склон Северного Урала.

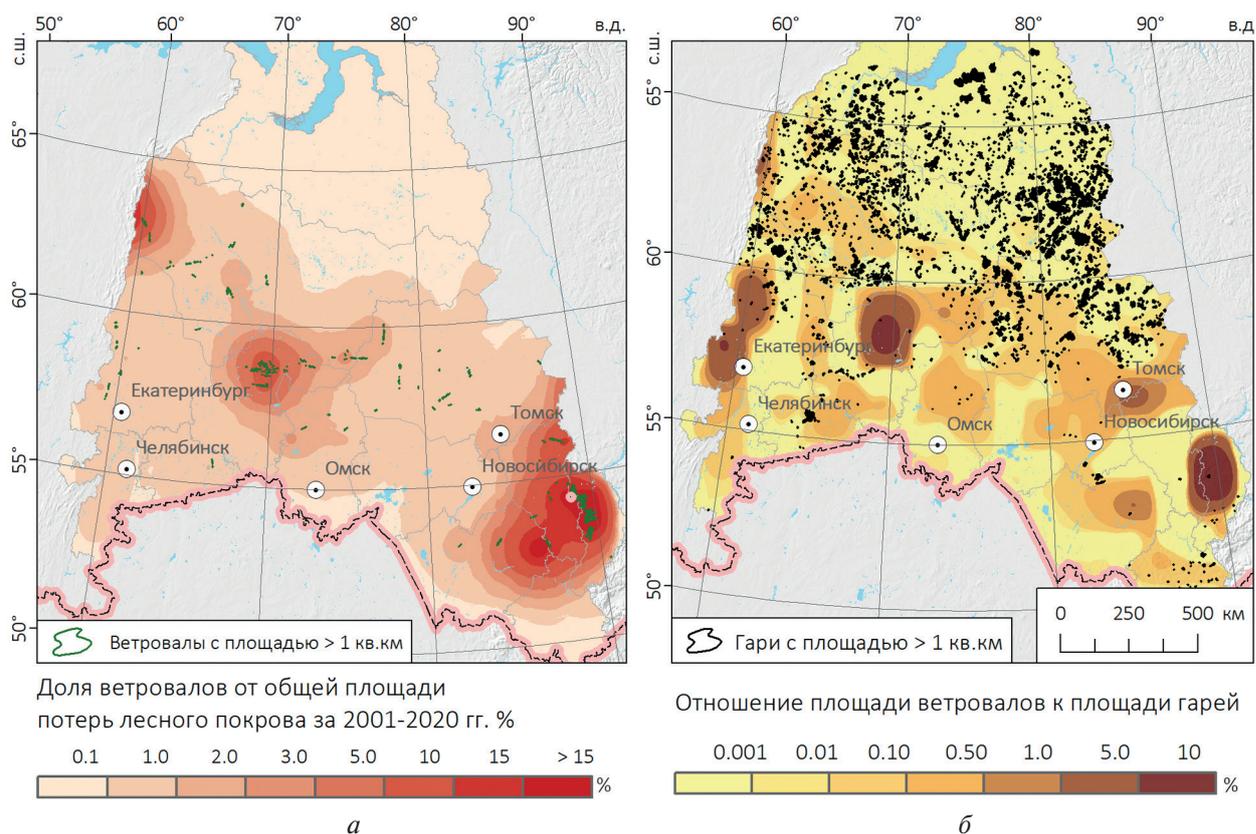


Рис. 4. Отношение площади ветровалов к общей площади потерь лесного покрова (а) и отношение площади гибели лесов от крупных ( $S > 100$  га) ветровалов и пожаров (б) за 2001–2020 гг.

В отличие от ЕТР, где около 90 % площади нарушений лесного покрова приходится на вырубку (Potarov et al., 2015), в Западной Сибири основной причиной гибели лесов выступают лесные пожары. Площадь гибели лесов от крупных ( $>100$  га) пожаров превышает площадь ветровалов в 77,5 раза. Для сравнения, на ЕТР площадь гибели лесов от пожаров превышает аналогичный показатель для ветровалов в 3,5–4,5 раза, согласно оценкам за разные периоды (Шихов, 2022; Potarov et al., 2015). Площадь потерь лесов от ветровалов больше, чем от пожаров, только в горной части Среднего Урала, а также Кузнецкого Алатау, в южной части Томской и на востоке Тюменской областей, т.е. в районах, где наблюдались наиболее крупные ветровалы, и в то же время не было масштабных вспышек природных пожаров (рис. 4б).

### Межгодовая изменчивость и годовой ход

Межгодовое распределение ветровалов в значительной степени определяется отдельными вспышками шквалов и смерчей (рис. 5а, см. с. 194). Наибольшее число случаев (30) отмечено в 2010 г., включая 16 смерчевых и 14 шкваловых ветровалов. Также более 20 ветровалов отмечено в 2001, 2007 и 2015 гг. При этом наибольшее число смерчевых ветровалов отмечено в 2001 и 2007 гг. (по 20 случаев), а шкваловых — в 2010 г. (14 случаев). По суммарной площади ветровалов выделяется 2019 г. (за счёт события 08.11.2019), а также 2001 и 2010 гг. Статистически значимый рост среднегодового количества и площади ветровалов в 2001–2020 гг. не обнаруживается.

При анализе внутригодового распределения необходимо отметить, что для 18 % ветровалов дата возникновения с точностью до месяца осталась неизвестной. Доля таких случаев меньше, чем на ЕТР (где она составляет 26 %), что может объясняться меньшей облачностью и, следовательно, более высокой частотой безоблачных снимков в течение вегетационного периода.

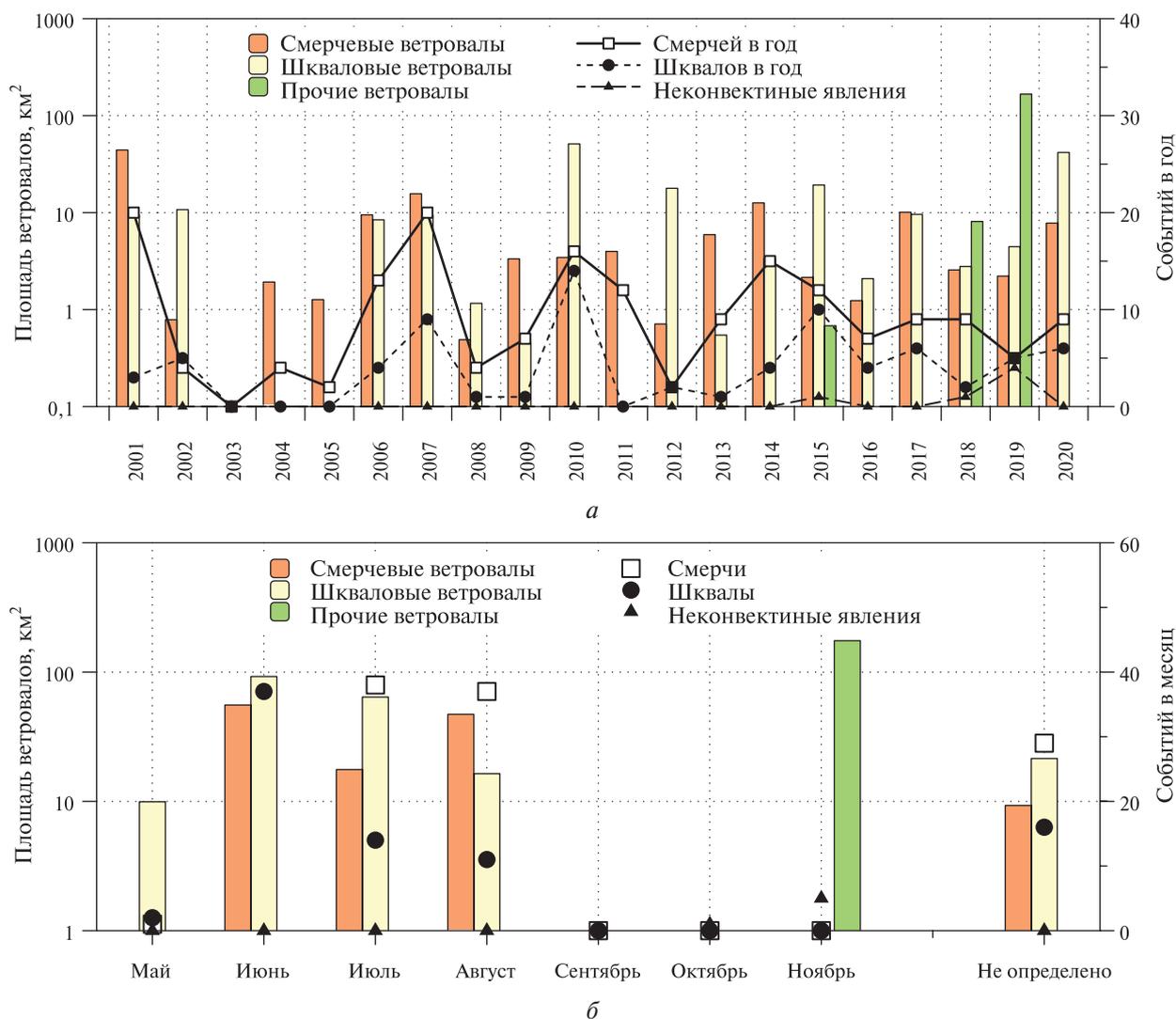


Рис. 5. Межгодовая (а) и внутригодовая (б) изменчивость количества ветровалов, вызванных разными метеорологическими явлениями, и их площади

В Западной Сибири ветровалы, связанные с конвективными явлениями, наблюдаются с мая по конец августа (самый ранний случай выявлен 25 мая, а самый поздний — 27 августа). Сезон возникновения ветровалов, вызванных шквалами и смерчами, в Западной Сибири существенно короче, чем на ЕТР что, однако, может быть обусловлено меньшим объёмом выборки случаев. Неконвективные явления вызывают ветровалы в октябре – ноябре. Как и на ЕТР, в Западной Сибири хорошо выделяется июньский максимум повторяемости шквалов и смерчей, связанный с сезонным максимумом развития конвекции (рис. 5б).

В летний период наибольший ущерб для лесного покрова связан с так называемыми вспышками шквалов и смерчей — совокупностью подобных событий, которые обусловлены одной синоптической системой: в течение суток могут возникать от двух до 20 и более ветровалов, связанных с прохождением одной или нескольких МКС. Всего выявлено семь случаев, когда за сутки отмечалось шесть и более ветровалов (табл. 2).

Время возникновения ветровала с точностью  $\pm 3$  ч удалось определить для 34 % случаев. В 48 случаях основным источником данных о времени возникновения ветровала были данные метеостанций, в 10 случаях — данные очевидцев явления и публикации в СМИ, в остальных 32 случаях — снимки с метеорологических спутников (Meteosat или Terra/Aqua MODIS). Ветровалы, для которых определено время возникновения, приурочены к наиболее значимым вспышкам, перечисленным в табл. 2. Как и на ЕТР, подавляющее большинство слу-

чаев шквалов и смерчей возникли во второй половине дня и вечером (между 15:00 и 23:00 по местному времени). Аналогичная закономерность суточного хода характерна для смерчей в Северной Евразии (Chernokulsky et al., 2020a). Также выявлено два случая прохождения шквалов и смерчей после полуночи по местному времени, они связаны со вспышкой 19 июня 2018 г.

Таблица 2. Крупнейшие по числу случаев вспышки шквалов и смерчей, вызвавшие ветровалы в лесной зоне Западной Сибири в период 2001–2020 гг.

Дата	Число ветровалов/штормовых событий	Распределение ветровалов по типам, смерчи/шквалы	Общая площадь, км <sup>2</sup>	Субъекты РФ	Сведения о зафиксированных метеорологических явлениях на станциях
23.06.2007	20/5	14/6	21,60	Свердловская обл., ХМАО	Порыв ветра 38 м/с, связанный со смерчем вблизи метеостанции «Бурмантово»
14.06.2010	15/4	4/11	47,35	Свердловская обл., ХМАО, Тюменская обл.	Шквалы до 19–24 м/с (метеостанции «Уват», «Вагайское», «Тобольск», «Екатеринбург»)
17.08.2014	8/2	7/1	4,332	Свердловская обл., ХМАО	Не зафиксировано
18.06.2015	16/1	11/4	13,92	Свердловская обл., ХМАО	Шквалы до 23 м/с (метеостанции «Атымья», «Октябрьское», «Уньюган»)
03.06.2017	6/2	2/3	15,25	Свердловская обл.	Шквалы до 26–27 м/с (Нижний Тагил, Липовское)
19.06.2018	7/4	5/2	4,74	Алтайский край, Новосибирская обл., Томская обл.	Шквалы до 28 м/с в Алтайском крае, до 24 м/с в Новосибирской обл.
08.11.2019	4/1	Штормовой ветер с осадками	166,4	Республика Хакасия	Ветер с порывами до 29 м/с, снегопад (27 мм/36 ч) на метеостанции «Ненастная»
07.06.2020	6/2	5/1	7,83	Кемеровская обл.	Шквалы до 21 м/с (метеостанция «Белово»), град до 10 мм

### Геометрические характеристики ветровалов

Суммарная площадь 10 крупнейших ветровалов составляет 296,6 км<sup>2</sup>, или 58,3 % от площади всех ветровалов. Из этих 10 ветровалов 2 самых крупных связаны со штормовым ветром неконвективной природы, 7 — со шквалами и 1 — со смерчем. Ветровал от смерча, наблюдавшегося в августе 2001 г. в Томской обл., имеет площадь 3149 га и занимает первое место по площади среди всех известных смерчевых ветровалов на территории России.

Среди ветровалов, вызванных смерчами, 52 % имеют длину трека менее 5 км, тогда как среди прочих ветровалов доля таких случаев составляет всего 21 % (рис. 6б). Наиболее протяжённый смерчевый ветровал имеет длину 66,3 км, а шкваловый — 151,6 км. Максимальную протяжённость (свыше 250 км) имеют треки, связанные со вспышками шквалов и смерчей 23.06.2007, 14.06.2010 и 18.06.2015, с каждым из этих событий связано более 10 ветровалов (см. табл. 2). Вспышка шквалов и смерчей 14.06.2010 по общей протяжённости связанных с ней ветровалов (769,5 км) может быть классифицирована как деречо согласно критериям, изложенным в работе (Johns, Hirt, 1987). По протяжённости полосы ветровалов данное событие существенно превосходит другие случаи деречо, наблюдавшиеся на ЕТР 27.06.2010 и 29.07.2010 (Chernokulsky et al., 2022), но по суммарной площади ветровалов уступает им более чем в 10 раз.

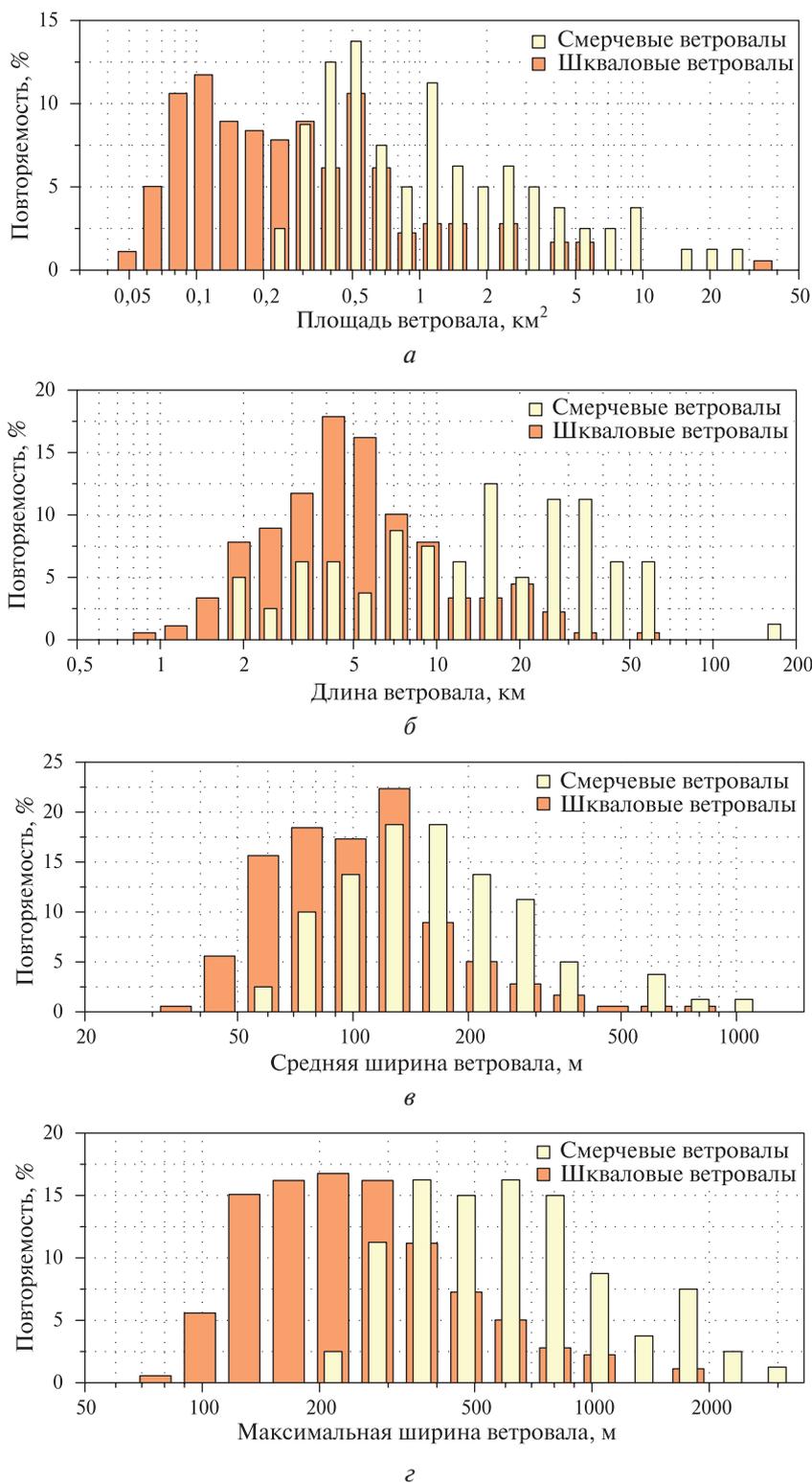


Рис. 6. Распределение геометрических характеристик ветровалов: а — площадь; б — длина; в, г — средняя и максимальная ширина без исключения разрывов

Средняя ширина смерчевых ветровалов в 50 % случаев была менее 100 м и в 91 % случаев — менее 200 м (рис. 6в). Для ветровалов, не связанных со смерчами, доля таких случаев составляет 21 и 62 % соответственно. По максимальной ширине среди всех ветровалов выделяется случай, вызванный штормовым ветром 08.11.2019 в Кузнецком Алатау (свыше 151 км). Среди смерчевых ветровалов наибольшую среднюю ширину имеет ветровал от смерча в ав-

густе 2001 г. в Александровском р-не Томской обл. (рис. 7а), а также на юго-востоке ХМАО 12 июля 2014 г. (рис. 7б).

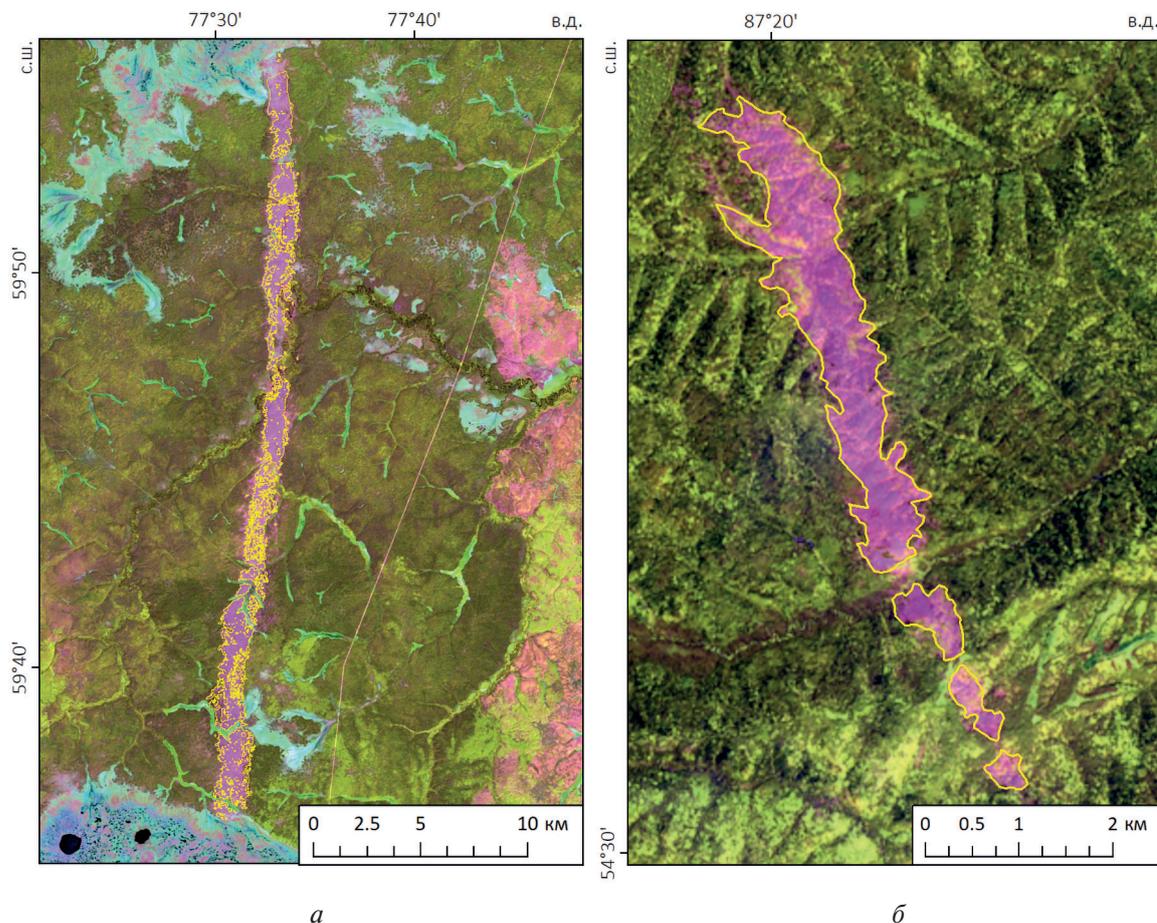


Рис. 7. Ветровалы от смерчей на снимках со спутников серии Landsat в спектральном синтезе SWIR-NIR-RED (SWIR — *англ.* short wave infrared, коротковолновый инфракрасный; NIR — *англ.* near infrared, ближний инфракрасный; RED — красный): а — в августе 2001 г. в Томской обл.; б — 12.07.2014 в ХМАО

Как и на ЕТР, в Западной Сибири ветровалы в основном вызываются смерчами и шквалами, которые перемещались с юга, юго-запада или с запада. Доля случаев, которые смещались с юго-западного квадранта, составляет 71,4 % (на ЕТР — 72,0 %). Аналогичное распределение по направлениям характерно и для случаев смерчей в Северной Евразии (Chernokulsky et al., 2020a). С южными циклонами может быть связано юго-восточное направление движения шквалов или смерчей (как, например, при вспышке смерчей 23.06.2007), а с ныряющими циклонами — северо-западное направление.

### Заключение

Создана картографическая база данных ветровалов в лесной зоне Западной Сибири, структура которой аналогична подобной базе для ЕТР (Shikhov et al., 2020). База данных для Западной Сибири включает 25 774 участка повреждения лесного покрова, которые относятся к 265 различным ветровалам. Эти ветровалы вызваны 158 различными штормовыми событиями. На основе собранных данных за 2001–2020 гг. выявлены отличительные особенности пространственно-временного распределения и причин возникновения ветровалов в Западной Сибири в сравнении с ЕТР.

В частности, общая площадь ветровалов составляет 508,3 км<sup>2</sup>, или 0,04 % от лесопокрытой площади, что в четыре раза меньше, чем на ЕТР за аналогичный период. Доля площади ветровалов от общей площади потерь лесного покрова составляет 1 % (на ЕТР — 2,6 %), при этом суммарная площадь крупных гарей (>100 га) превышает площадь ветровалов в 77,5 раза (на ЕТР за тот же период — всего в 3,5 раза). Это подтверждает ранее полученные оценки (Shikhov et al., 2019) небольшой в сравнении с пожарами роли ветровалов как фактора нарушений лесного покрова в Западной Сибири.

Свыше 67 % числа ветровалов, включённых в базу данных, вызваны смерчами. На них приходится 25,4 % от общей площади ветровалов, что значительно больше, чем на ЕТР. В свою очередь, доля ветровалов, вызванных шквалами, составляет около 40 % от общей площади (в два раза меньше, чем на ЕТР). Неконвективные явления, на которые приходится только 2,5 % от числа случаев ветровалов, обусловили 34,5 % от общей площади ветровалов.

Максимальная плотность ветровалов выявлена в Кемеровской обл., а также на западе Томской обл. и на юго-востоке ХМАО. Это может быть обусловлено высокой лесистостью территории, широким распространением лесобразующих пород, подверженных воздействию ветра, а также циркуляционными условиями, благоприятными для возникновения шквалов и смерчей. Однако это может быть также и следствием достаточно короткой выборки.

Наибольшее число случаев ветровалов зафиксировано в 2007 и 2010 гг. Смерчи и шквалы, вызывающие ветровалы, чаще всего наблюдаются в июне, а ветровалы, вызванные неконвективными явлениями, отмечались в октябре — ноябре в горах Урала и Кузнецкого Алатау. Выявлено несколько крупных вспышек шквалов и смерчей, которые, однако, в 10 раз и более уступают по площади повреждения лесов крупнейшим подобным событиям на ЕТР. Одно из штормовых событий может быть предварительно классифицировано как деречко. Также на территории Западной Сибири выявлено пять случаев смерчей с максимальной шириной полосы ветровала свыше 1000 м.

Сбор данных выполнен при поддержке совместного проекта Российского научного фонда (РНФ) и правительства Пермского края (№ 22-27-20018), анализ данных — при поддержке РНФ (проект № 18-77-10076).

## Литература

1. Алесенков Ю. М., Поздеев Е. Г., Шлыкова Н. А., Теринов Н. Н., Иванина Н. А. О последствиях ветровала 1995 г. в Висимском госзаповеднике // Леса Урала и хозяйство в них / Министерство общего и профессионального образования РФ; Уральская гос. лесотехн. акад.; Швейцарский федеральный научно-исслед. ин-т леса, снега и ландшафта. Екатеринбург, 1998. Вып. 20. С. 272–278.
2. Алесенков Ю. М., Мишин А. С., Успен А. А., Якушев А. Б. Влияние штормовых ветров на леса заповедников Урала // Экологич. исслед. в Висимском биосферном заповеднике: материалы конф. Екатеринбург, 2006. С. 41–47.
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. Крылов А. М., Малахова Е. Г., Владимирова Н. А. Выявление и оценка площадей катастрофических ветровалов 2009–2010 гг. по данным космической съемки // Изв. Санкт-Петербургской лесотехн. акад. 2012. № 200. С. 197–207.
5. Мельник М. А., Мельник С. А. Сильный ветер как опасный фактор для лесопользования в южно-таежной зоне Западной Сибири // Интерэкспо Гео-Сибирь. 2016. Т. 3. № 3. С. 105–109.
6. Петухов И. Н. Роль массовых ветровалов в формировании лесного покрова в подзоне южной тайги (Костромская область): дис. ... канд. биол. наук. Кострома, 2016. 150 с.
7. Разуваев В. Н., Бульгина О. Н., Коршунова Н. Н., Клещенко Л. К., Кузнецова В. Н., Трофименко Л. Т., Шерстюков А. Б., Швець Н. В., Давлетишин С. Г., Зверева Г. Н. Научно-прикладной справочник «Климат России»: свидетельство о гос. регистрации базы данных № 2020621470. Рег. 18.08.2020.
8. Рожков А. А., Козак В. Г. Устойчивость лесов. М.: Агропромиздат, 1989. 239 с.
9. Чернокульский А. В., Курганский М. В., Мохов И. И., Шихов А. Н., Ажигов И. О., Селезнева Е. В., Захарченко Д. И., Антонеску Б., Кюне Т. Смерчи в российских регионах // Метеорология и гидрология. 2021. № 2. С. 17–34.

10. Чернокульский А. В., Елисеев А. В., Козлов Ф. А., Коршунова Н. Н., Курганский М. В., Мохов И. И., Семенов В. А., Швець Н. В., Шихов А. Н., Ярынич Ю. И. Опасные атмосферные явления конвективного характера в России: наблюдаемые изменения по различным данным // Метеорология и гидрология. 2022. № 5. (В печати.)
11. Шихов А. Н. Опасные метеорологические явления, связанные с ветром, и их воздействие на лесной покров Европейской территории России: методы идентификации, закономерности пространственно-временного распределения и условия возникновения: автореф дис. ... д-ра геогр. наук. Казань, 2022. 43 с.
12. Baumann M., Ozdogan M., Wolter P. T., Krylov A. M., Vladimirova N. A., Radeloff V. C. Landsat remote sensing of forest windfall disturbance // Remote Sensing of Environment. 2014. V. 143. P. 171–179. DOI: 10.1016/j.rse.2013.12.020.
13. Chernokulsky A. V., Shikhov A. N. 1984 Ivanovo tornado outbreak: Determination of actual tornado tracks with satellite data // Atmospheric Research. 2018. V. 207. P. 111–121. DOI: 10.1016/j.atmosres.2018.02.011.
14. Chernokulsky A., Kurgansky M., Mokhov I., Shikhov A., Azhigov I., Selezneva E., Zakharchenko D., Antonescu B., Kühne T. (2020a) Tornadoes in Northern Eurasia: from the Middle Age to the Information Era // Monthly Weather Review. 2020. V. 148. P. 3081–3111. DOI: 10.1175/MWR-D-19-0251.1.
15. Chernokulsky A., Shikhov A., Bykov A., Azhigov I. (2020b) Satellite-Based Study and Numerical Forecasting of Two Tornado Outbreaks in the Ural Region in June 2017 // Atmosphere. 2020. V. 11. Art. No. 1146. 34 p. DOI: 10.3390/atmos11111146.
16. Chernokulsky A., Shikhov A., Bykov A., Kalinin N., Kurgansky M., Sherstyukov B., Yarinich Y. Diagnosis and modelling of two destructive derecho events in European Russia in the summer of 2010 // Atmospheric Research. 2022. V. 267. Art. No. 105928. 17 p. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2021.105928>.
17. Dyukarev E. A., Pologova N. N., Golovatskaya E. A., Dyukarev A. G. Forest cover disturbances in the south taiga of West Siberia // Environmental Research Letters. 2011. V. 6(3). Art. No. 035203. 10 p. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/6/3/035203>.
18. Giglio L., Schroeder W., Justice C. O. The collection 6 MODIS active fire detection algorithm and fire products // Remote Sensing of Environment. 2016. V. 178. P. 31–41. DOI: 10.1016/j.rse.2016.02.054.
19. 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. DOI: 10.1126/science.1244693.
20. Haylock M. R. European extra-tropical storm damage risk from a multi-model ensemble of dynamically-downscaled global climate models // Natural Hazards and Earth System Sciences. 2011. V. 11. P. 2847–2857. DOI: 10.5194/nhess-11-2847-2011.
21. Johns R. H., Hirt W. D. Derechos: Widespread convectively induced windstorms // Weather and Forecasting. 1987. V. 2. P. 32–49. DOI: 10.1175/1520-0434(1987)002<0032:DWCIW>2.0.CO;2.
22. 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. 9 p. DOI: 10.1088/1748-9326/9/10/105007.
23. Lassig R., Mocalov 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. DOI: 10.1016/S0378-1127(00)00309-1.
24. Mitchell S. J. Wind as a natural disturbance agent in forests: a synthesis // Forestry. 2013. V. 86. P. 147–157. DOI: 10.1093/forestry/cps058.
25. 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. DOI: 10.1016/j.rse.2014.11.027.
26. Schelhaas M.-J., Nabuurs G.-J., Schuck A. Natural disturbances in the European forests in the 19<sup>th</sup> and 20<sup>th</sup> centuries // Global Change Biology. 2003. V. 9(11) P. 1620–1633. DOI: 10.1046/j.1365-2486.2003.00684.x.
27. Seidl R., Fernandes P. M., Fonseca T. F., Gillet F., Jönsson A. M., Merganičová K., Netherer S., Arpacı 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. DOI: 10.1016/j.ecolmodel.2010.09.040.
28. Senf C., Seidl R. Storm and fire disturbances in Europe: Distribution and trends // Global Change Biology. 2021. V. 27. P. 3605–3619. DOI: 10.1111/gcb.15679.
29. 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. DOI: 10.1016/j.rse.2017.10.002.

30. 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. DOI: 10.1007/s11069-019-03642-z.
31. 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. DOI: 10.5194/essd-12-3489-2020.
32. Shikhov A., Chernokulsky A., Azhigov I. Windthrow events in the forest zone of Western Siberia in 2001–2020 // *figshare.com*. 2022. <https://doi.org/10.6084/m9.figshare.19582786.v1>.
33. 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. DOI: 10.1016/S0378-1127(00)00307-8.
34. Venäläinen A., Lehtonen I., Laapas M., Ruosteenoja K., Tikkanen O-P., Viiri H., Ikonen V-P., Peltola H. Climate change induces multiple risks to boreal forests and forestry in Finland: A literature review // *Global Change Biology*. 2020. V. 26(8). P. 4178–4196. DOI: 10.1111/gcb.15183.

## Spatio-temporal distribution and origins of windthrow events in the forest zone of Western Siberia in 2001–2020

A. N. Shikhov<sup>1</sup>, A. V. Chernokulsky<sup>2,3</sup>, I. O. Azhigov<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Perm State University, Perm 614990, Russia  
E-mail: shikhovan@gmail.com

<sup>2</sup> A. M. Obukhov Institute of Atmospheric Physics RAS, Moscow 119017, Russia  
E-mail: a.chernokulsky@ifaran.ru

<sup>3</sup> Institute of Geography RAS, Moscow 119017, Russia

The paper presents the main characteristics of the spatial and temporal distribution of windthrow events in the forest zone of Western Siberia for the period 2001–2020. Windthrow data is obtained from Landsat, Sentinel-2 satellite images, Global Forest Change data, and high-resolution satellite images from open map services. We used weather stations observations, images from meteorological satellites, and information on hazardous weather events to define the dates and time of storm events. The compiled database includes 25 774 elementary damaged areas, which are grouped to 265 different windthrow areas. These windthrow areas are associated with 158 different storm events. The data is available at <https://doi.org/10.6084/m9.figshare.19582786.v1>. The total area of windthrow is 508.3 km<sup>2</sup> (0.04 % of the total forested area), which is 4 times less than in the European Russia (ER) for the same period. Over 67% of the windthrow events are caused by tornadoes, they also account for 25.4 % of the total area, which is substantially more than the same proportion for ER. Squalls and non-convective windstorms account for 30 % (2.5 %) of cases and 40 % (34.5 %) of the damaged area, respectively. The maximum density of windthrow events was found in the Kemerovo region, as well as in the west of the Tomsk region and in the southeast of the Khanty-Mansiysk Autonomous region. The largest number of windthrow events was reported in 2007 and 2010. Tornadoes and squalls causing windthrow are most often observed in June, while windthrow caused by non-convective storms were observed in October or November (in the Ural and Kuznetsk Alatau mountains). We found several large squall and tornado outbreaks. However, windthrow area associated with them is about 10 times lower comparing with the strongest storm events observed in ER. In general, the total wind-damaged area is 77.5 times less than the total area of stand-replacing fires for the same period.

**Keywords:** windthrow, tornadoes, squalls, non-convective storms, spatio-temporal distribution, Western Siberia, Landsat, Sentinel-2, Global Forest Change

Accepted: 26.05.2022

DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-3-186-202

## References

1. Alesenkov Yu. M., Pozdeev E. G., Shlykova N. A., Terinov N. N., Ivanina N. A., On the consequences of the 1995 windthrow in the Visimsky State Reserve, *Lesnaya Urala i khozyaistvo v nikh*, Ekaterinburg, 1998, Vol. 20, pp. 272–278 (in Russian).
2. 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).
3. Bartalev S. A., Egorov V. A., Zharko V. O., Loupian E. A., Plotnikov D. E., Khvostikov S. A., Shabanov N. V., *Sputnikovoe kartografirovaniye rastitel'nogo pokrova Rossii* (Satellite-based mapping of the vegetation cover of Russia), Moscow: IKI, 2016, 208 p. (in Russian).
4. Krylov A. M., Malakhova E. G., Vladimirova N. A., Identification and assessment of forest areas damaged by windfalls in 2009–2010 by means of remote sensing, *Izvestiya Sankt-Peterburgskoi lesotekhnicheskoi akademii*, 2012, Vol. 200, pp. 197–207 (in Russian).
5. Melnik M. A., Melnik S. A., Strong wind as factor of hazards for forest management in the southern taiga zone of Western Siberia, *Interesko Geo-Sibir'*, 2016, Vol. 3(3), pp. 105–109 (in Russian).
6. Petukhov I. N., *Rol' massovykh vetrovalov v formirovaniye lesnogo pokrova v podzone yuzhnoi taigi (Kostromskaya 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).
7. Razuvaev V. N., Bulygina O. N., Korshunova N. N., Kleshchenko L. K., Kuznetsova V. N., Trofimenko L. T., Sherstyukov A. B., Shvets' N. V., Davletshin S. G., Zvereva G. N., *Nauchno-prikladnoi spravochnik "Klimat Rossii"* (Scientific and applied reference book "Climate of Russia"), Certificate of state registration of data base No. 2020621470 (RU), Reg. 18.08.2020 (in Russian).
8. Rozhkov A. A., Kozak V. G., *Ustoichivost' lesov* (Forest's sustainability), Moscow: Agropromizdat, 1989, 239 p. (in Russian).
9. Chernokulsky A. V., Kurgansky M. V., Mokhov I. I., Selezneva E. V., Zakharchenko D. I., Shikhov A. N., Azhigov I. O., Antonescu B., Kuhne T., Tornadoes in the Russian regions, *Russian Meteorology and Hydrology*, 2021, Vol. 46. No. 2, pp. 69–82, DOI: 0.3103/S1068373921020023.
10. Chernokulsky A. V., Eliseev A. V., Kozlov F. A., Korshunova N. N., Kurganskii M. V., Mokhov I. I., Semenov V. A., Shvets' N. V., Shikhov A. N., Yarynich Yu. I., Convective hazardous weather events in Russia: observed changes according to various data, *Russian Meteorology and Hydrology*, 2022, Vol. 47 (in Russian, in press).
11. Shikhov A. N., *Opasnye meteorologicheskie yavleniya, svyazannye s vetrom, i ikh vozdeistvie na lesnoi pokrov Evropeiskoi territorii Rossii: metody identifikatsii, zakonomernosti prostranstvenno-vremennogo raspredeleniya i usloviya vozniknoveniya: Avtoref. diss. kand. geogr. nauk* (Wind-related hazardous weather events and their impact of the forest cover in the European territory of Russia: identification methods, patterns of the spatio-temporal distribution and formation environments, Ext. abstract Doct. geogr. sci. thesis), Kazan, 2022, 43 p. (in Russian).
12. Baumann M., Ozdogan M., Wolter P. T., Krylov A. M., Vladimirova N. A., Radeloff V. C., Landsat remote sensing of forest windfall disturbance, *Remote Sensing of Environment*, 2014, Vol. 143, pp. 171–179, DOI: 10.1016/j.rse.2013.12.020.
13. Chernokulsky A. V., Shikhov A. N., 1984 Ivanovo tornado outbreak: Determination of actual tornado tracks with satellite data, *Atmospheric Research*, 2018, Vol. 207, pp. 111–121, DOI: 10.1016/j.atmosres.2018.02.011.
14. Chernokulsky A., Kurgansky M., Mokhov I., Shikhov A., Azhigov I., Selezneva E., Zakharchenko D., Antonescu B., Kühne T. (2020a), Tornadoes in Northern Eurasia: from the Middle Age to the Information Era, *Monthly Weather Review*, 2020, Vol. 148, pp. 3081–3111, DOI: 10.1175/MWR-D-19-0251.1.
15. Chernokulsky A., Shikhov A., Bykov A., Azhigov I. (2020b), Satellite-Based Study and Numerical Forecasting of Two Tornado Outbreaks in the Ural Region in June 2017, *Atmosphere*, 2020, Vol. 11, Art. No. 1146, 34 p., DOI: 10.3390/atmos11111146.
16. Chernokulsky A., Shikhov A., Bykov A., Kalinin N., Kurgansky M., Sherstyukov B., Yarinich Y., Diagnosis and modelling of two destructive derecho events in European Russia in the summer of 2010, *Atmospheric Research*, 2022, Vol. 267, Art. No. 105928, 17 p., <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2021.105928>.
17. Dyukarev E. A., Pologova N. N., Golovatskaya E. A., Dyukarev A. G., Forest cover disturbances in the south taiga of West Siberia, *Environmental Research Letters*, 2011, Vol. 6(3), Art. No. 035203, 10 p., <https://doi.org/10.1088/1748-9326/6/3/035203>.
18. Giglio L., Schroeder W., Justice C. O., The collection 6 MODIS active fire detection algorithm and fire products, *Remote Sensing of Environment*, 2016, Vol. 178, pp. 31–41, DOI: 10.1016/j.rse.2016.02.054.
19. 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, DOI: 10.1126/science.1244693.

20. Haylock M. R., European extra-tropical storm damage risk from a multi-model ensemble of dynamically-downscaled global climate models, *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 2011, Vol. 11, pp. 2847–2857, DOI: 10.5194/nhess-11-2847-2011.
21. Johns R. H., Hirt W. D., Derechos: Widespread convectively induced windstorms, *Weather and Forecasting*, 1987, Vol. 2, pp. 32–49, DOI: 10.1175/1520-0434(1987)002<0032:DWCIW>2.0.CO;2.
22. 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, 9 p., DOI: 10.1088/1748-9326/9/10/105007.
23. Lassig R., Mocalov 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, DOI: 10.1016/S0378-1127(00)00309-1.
24. Mitchell S. J., Wind as a natural disturbance agent in forests: a synthesis, *Forestry*, 2013, Vol. 86, pp. 147–157, DOI: 10.1093/forestry/cps058.
25. 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, DOI: 10.1016/j.rse.2014.11.027.
26. 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, DOI: 10.1046/j.1365-2486.2003.00684.x.
27. 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, DOI: 10.1016/j.ecolmodel.2010.09.040.
28. Senf C., Seidl R., Storm and fire disturbances in Europe: Distribution and trends, *Global Change Biology*, 2021, Vol. 27, pp. 3605–3619, DOI: 10.1111/gcb.15679.
29. 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, DOI: 10.1016/j.rse.2017.10.002.
30. 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, DOI: 10.1007/s11069-019-03642-z.
31. 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, DOI: 10.5194/essd-12-3489-2020.
32. Shikhov A., Chernokulsky A., Azhigov I., Windthrow events in the forest zone of Western Siberia in 2001–2020, *figshare.com*, 2022, <https://doi.org/10.6084/m9.figshare.19582786.v1>.
33. 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, DOI: 10.1016/S0378-1127(00)00307-8.
34. Venäläinen A., Lehtonen I., Laapas M., Ruosteenoja K., Tikkanen O.-P., Viiri H., Ikonen V.-P., Peltola H., Climate change induces multiple risks to boreal forests and forestry in Finland: A literature review, *Global Change Biology*, 2020, Vol. 26(8), pp. 4178–4196, DOI: 10.1111/gcb.15183.