

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Пермский государственный национальный исследовательский  
университет»

А.Н. Шихов, А.В. Чернокульский, Н.А. Калинин, С.В. Пьянков

# **ВЕТРОВАЛЫ**

## **В ЛЕСНОЙ ЗОНЕ РОССИИ И УСЛОВИЯ ИХ ВОЗНИКНОВЕНИЯ**

Монография



Пермь 2023

УДК 551.515/528.88  
ББК 26.236 + 26.113.4  
Ш653

Шихов А. Н.

Ш653

Ветровалы в лесной зоне России и условия их возникновения : монография / А. Н. Шихов, А. В. Чернокульский, Н. А. Калинин, С. В. Пьянков ; Пермский государственный национальный исследовательский университет. – Пермь, 2023. – 284 с.

ISBN 978-5-7944-4009-6

В монографии обобщены результаты многолетних исследований ветровалов в лесной зоне Европейской территории России (ЕТР) и Сибири, а также условий их возникновения. Представлена методика сбора и систематизации данных о ветровалах по спутниковым снимкам, которая обеспечивает получение многолетней статистики случаев шквалов и смерчей, вызывающих ветровалы в лесной зоне. На ее основе созданы уникальные картографические базы данных о ветровалах в лесной зоне ЕТР (за период 1986–2020 гг.) и в Сибири (за период 2001–2020 гг.). Определена роль крупных сплошных ветровалов как фактора нарушения лесного покрова ЕТР и Сибири в сравнении с вырубками и пожарами, а также уточнены для исследуемой территории закономерности, определяющие подверженность лесов ветровалам. На основе данных наземных, спутниковых наблюдений, реанализа и численного моделирования выявлены особенности атмосферных процессов макро- и мезомасштаба при возникновении шквалов и смерчей, вызывающих ветровалы.

Монография адресована широкому кругу ученых и специалистов, аспирантов и студентов, занимающихся вопросами дистанционного зондирования лесного покрова, устойчивого управления лесными ресурсами, мониторинга и прогнозирования опасных метеорологических явлений, глобальных изменений климата.

УДК 551.515/528.88  
ББК 26.236 + 26.113.4

Печатается по решению кафедры картографии и геоинформатики Пермского государственного национального исследовательского университета. Издание осуществлено при поддержке Российского научного фонда и Пермского края (проект №22-27-20018).

**Рецензенты:**

д-р биол. наук, профессор кафедры метеорологии и климатологии Московского государственного университета им. М. В. Ломоносова А.В. Ольчев;

д-р геогр. наук, профессор, зав. кафедрой метеорологии и климатологии Томского государственного университета В. П. Горбатенко

ISBN 978-5-7944-4009-6

© Шихов А.Н., Чернокульский А.В., Калинин Н.А., Пьянков С.В., 2023

© Пермский государственный национальный исследовательский университет, 2023

# СОДЕРЖАНИЕ

<b>6</b>	<b>Введение</b>
<b>9</b>	<b>Глава 1. Ветровалы как фактор нарушения лесного покрова</b>
	1.1. Основные определения и классификации
<b>11</b>	1.2. Ветровалы и другие нарушения лесного покрова в условиях современного изменения климата
<b>21</b>	1.3. Основные факторы, определяющие подверженность лесов ветровалам
<b>24</b>	<b>Глава 2. Идентификация и картографирование ветровалов</b>
	2.1. Методы идентификации ветровалов и оценки их характеристик по данным дистанционного зондирования Земли
<b>35</b>	2.2. Характеристика территории исследования и исходных материалов
<b>42</b>	2.3. Создание картографических баз данных о ветровалах
<b>73</b>	2.4. Основные ограничения методики и полученных данных

- 78**      **Глава 3. Пространственно-временное распределение ветровалов и вызывающих их штормовых событий**
- 3.1. Пространственно-временное распределение ветровалов в лесной зоне ЕТР в 1986-2020 гг.
- 99**      3.2. Пространственно-временное распределение ветровалов в лесной зоне Западной и Центральной Сибири в 2001-2020 гг.
- 114**     3.3. Выдающиеся штормовые события, вызвавшие ветровалы в лесной зоне ЕТР и Сибири
- 125**     3.4. Значимость ветровалов как фактора нарушения лесного покрова
- 132**     3.5. Некоторые закономерности, определяющие подверженность лесов ветровалам
- 146**     3.6. База данных и картографический веб-сервис «Смерчи в лесной зоне России»
- 
- 160**     **Глава 4. Условия возникновения шквалов и смерчей, вызывающих ветровалы**
- 4.1. Связь шквалов и смерчей, вызывающих ветровалы, с некоторыми макроциркуляционными характеристиками
- 172**     4.2. Мезомасштабные процессы, обуславливающие возникновение шквалов и смерчей
- 210**     4.3. Моделирование и прогноз шквалов и смерчей, вызывающих крупные ветровалы, с помощью региональной модели атмосферы WRF

**238**    **Заключение**

**242**    **Список сокращений**

**242**        Сокращения на русском языке

**243**        Сокращения на иностранных языках

**247**    **Список литературы**

**280**    **Приложения**

        Структура атрибутивного описания элементарных участков ветровалов

        Структура атрибутивного описания ветровалов

**283**        Структура атрибутивного описания штормовых событий

## ВВЕДЕНИЕ

Опасные метеорологические явления, связанные с ветром часто являются причиной возникновения чрезвычайных ситуаций и гибели людей. Среди различных видов негативных последствий этих явлений особое место занимают повреждения лесного покрова – ветровалы. С одной стороны, ветровалы являются неотъемлемым элементом динамики лесных экосистем, но с другой стороны они могут иметь катастрофический характер и сопровождаться значительным ущербом для ряда отраслей экономики.

В последние десятилетия во многих регионах мира, в частности в зарубежной Европе, наблюдается рост повторяемости и масштабов ветровалов, который принято связывать с современным глобальным потеплением (Seidl et al., 2014, 2017; Gregow et al., 2017). В условиях изменения климата в XXI веке, в частности роста значений индексов конвективной неустойчивости и связанных с ними конвективных явлений (Diffenbaugh et al., 2013; Radler et al., 2019), в лесах бореального и умеренного пояса вероятно повышение риска катастрофических ветровалов. Увеличение масштаба повреждений лесного покрова ветровалами может быть одним из существенных эффектов воздействия изменений климата на наземные экосистемы (IPCC, 2021).

В России в отдельных случаях ветровалы также имеют характер стихийного бедствия. Площадь крупнейших сплошных ветровалов в лесах России исчисляется десятками тысяч га (Shikhov et al., 2020), а запас поврежденной древесины – до 10–20 млн. м<sup>3</sup> и более (Рожков, Козак, 1989), что превышает годовой объем заготовки леса для целых субъектов РФ. Если в целом по стране 65,5% от всей площади нарушений лесного покрова приходится на лесные пожары (Krylov et al., 2014), то в ряде регионов на Европейской территории России (ЕТР) ведущим природным фактором нарушений являются именно ветровалы (Петухов, Немчинова, 2014).

При этом данные о ветровалах как факторе нарушений лесного покрова на территории России до недавнего времени были весьма фрагментарными. В частности, не были опубликованы многолетние базы данных о ветровалах, за исключением отдельных регионов. Известны лишь обобщенные оценки площадей ветровалов на всей ЕТР (Potapov et al., 2015), а для большинства регионов Сибири отсутствуют даже такие оценки. В то же время для зарубежной Европы многолетние данные о ветровалах и вызвавших их штормовых событиях доступны за период с 1950 г. (Schelhaas et al., 2003; Gardiner et al., 2010), а для некоторых стран – даже с XIX в. (Nilsson et al., 2004; Usbeck et al., 2010).

Многолетние спутниковые данные о ветровалах представляют собой новый источник информации для изучения современной климатологии шквалов и смерчей, которые по причине локального характера часто не фиксируются наблюдательной сетью. Так, по данным (Chernokulsky et al., 2020a), доля случаев смерчей, зафиксированных по информации национальных метеослужб, составляет всего 3,8% от всех известных случаев смерчей в Северной Евразии. В то же время анализ спутниковых снимков ветровалов позволяет получить реалистичную оценку повторяемости и пространственного распределения сильных шквалов и смерчей в лесной зоне, независимую от плотности населения и наблюдательной сети. Это особенно актуально для территории России, в связи с низкой плотностью сети метеостанций и отсутствием радиолокационных наблюдений на большей части страны.

Спутниковые снимки и данные аэрофотосъемки активно применяются во многих странах мира, в основном для уточнения характеристик уже известных случаев смерчей (см. напр. Dyer, 1988; Jedlovec et al., 2006; Myint et al., 2008; Molthan et al., 2014; Rodriguez et al., 2021). Однако эти данные до последнего времени не использовались для получения новых знаний о климатологии шквалов и смерчей на основе идентификации ранее неизвестных случаев. Первое подобное исследование было выполнено нами на примере случаев смерчей на ЕТР (Shikhov, Chernokulsky, 2018), а в настоящее время аналогичный подход используется также в Канаде (Sills et al., 2020; Kunkel et al., 2023).

Метеорологические условия возникновения сильных шквалов и смерчей в России до недавнего времени оставались малоизученными в сравнении со странами Европы и Северной Америки, что может негативно влиять на точность их краткосрочного прогноза. Одной из причин этого является отсутствие открытых баз данных об этих явлениях. Получение многолетней информации о ветровалах, вызванных шквалами и смерчами, позволяет закрыть этот пробел. Представляет интерес также связь шквалов и смерчей, вызывающих катастрофические ветровалы, с определенными типами атмосферной циркуляции и с блокирующими антициклонами в теплый период года, повторяемость которых на фоне современного потепления климата может возрасти.

Таким образом, исследования ветровалов на территории России актуальны как для оценки значимости этого вида нарушений лесного покрова и обеспечения устойчивого лесопользования, так и для получения новых знаний о климатологии сильных шквалов и смерчей, вызывающих ветровалы, и об условиях их возникновения.

В настоящей работе обобщены основные результаты исследований авторов в области спутникового мониторинга и картографирования ветровалов, а также диагностики условий возникновения метеорологических явлений (шквалов, смерчей, сильных ветров), вызывающих ветровалы. Среди этих результатов можно выделить два основных:

- впервые выполнена оценка роли крупных сплошных ветровалов как фактора воздействия на лесной покров ЕТР и Сибири, их пространственно-временного распределения и причин возникновения;
- реализован новый подход к получению многолетней статистики случаев сильных шквалов и смерчей в лесной зоне, основанный на сборе и систематизации данных о ветровалах по спутниковым снимкам. Это позволило получить существенный объем новых знаний о климатологии и закономерностях возникновения шквалов и смерчей в лесной зоне Северной Евразии.

Также в результате исследования были разработаны картографические веб-сервисы: «Смерчи в лесной зоне России» (<http://tornado.psu.ru/>) для публикации данных о ветровалах (в том числе в оперативном режиме), и «Опасные явления погоды Центрального Федерального округа (ЦФО)» (<http://convective-storms.psu.ru/>) для публикации данных о конвективных опасных явлениях погоды на территории ЦФО. Эти базы данных и картографические веб-сервисы используются для решения различных прикладных и научных задач.

Авторы выражают искреннюю благодарность коллегам, которые принимали участие в исследованиях на различных этапах. В частности, это сотрудники географического факультета Пермского государственного национального исследовательского университета (ПГНИУ): к.т.н. Р.К. Абдуллин, к.т.н. А.В. Тарасов, к.г.н. А.В. Быков, к.г.н. Е.В. Пищальникова, А.В. Семакина; выпускники кафедры картографии и геоинформатики ПГНИУ С.И. Перминов, Е.С. Перминова; научные сотрудники Института физики атмосферы РАН (д.ф.-м.н. М.В. Курганский, А.В. Спрыгин) и НИВЦ МГУ им. М.В. Ломоносова (Ю.И. Ярынич). Также авторы благодарны И.О. Ажигову и волонтерам сообщества «Метеодневник» (<https://vk.com/meteodnevnik>), которые оказали значительную помощь в сборе первичных данных о ветровалах и вызвавших их шквалах и смерчах.

Исследования, которые легли в основу настоящей монографии, выполнены при поддержке грантов РФФИ № 18-77-10076 и 22-27-20018, РФФИ № 19-05-00046а и 20-35-70044 в ПГНИУ и в Институте физики атмосферы РАН.

# ГЛАВА 1

## ВЕТРОВАЛЫ КАК ФАКТОР НАРУШЕНИЯ ЛЕСНОГО ПОКРОВА

### 1.1. Основные определения и классификации

Ветровалы представляют собой один из видов нарушений лесного покрова, а сильные ветры, шквалы и смерчи – фактор (агент), вызывающий эти нарушения. Другими значимыми природными агентами, вызывающими нарушения лесного покрова, являются пожары, засухи и вспышки размножения насекомых – вредителей леса. В целом нарушения лесного покрова природного характера являются одним из основных факторов, формирующих динамику лесных экосистем во всем мире, в том числе в бореальной зоне (Seidl et al., 2017).

Ключевыми характеристиками всех видов нарушений лесного покрова являются интенсивность явления, вызвавшего нарушение, периодичность и степень повреждения древостоя (в англоязычной литературе – severity). Применительно к ветровалам под интенсивностью понимают скорость ветра, вызвавшую повреждение древостоя (Mitchell et al., 2013). Степень повреждения оценивается как доля погибших деревьев или производный показатель, например, в российской практике применяется средневзвешенная категория состояния (Барталев и др., 2010). Для всех видов нарушений лесного покрова интенсивность вызывающих их явлений обратно пропорциональна периодичности, а степень повреждения древостоя имеет прямую зависимость от интенсивности (Frelich, Lorimer, 1991).

Ветровалы как нарушения лесного покрова часто рассматриваются лишь в узком смысле – как экстремальные, катастрофические события, связанные с массовым вывалом деревьев и полным разрушением древостоя. Однако в большинстве случаев они представляют собой регулярно повторяющийся процесс в лесной экосистеме (Mitchell, 2013). В связи с этим, предложены разные классификации ветровалов. Так, Н.Г. Улановой предложено рассматривать ветровалы на трех разных иерархических уровнях: на уровне ландшафта (катастрофические ветровалы), лесного сообщества (вывал отдельных деревьев или их групп – когорт), и на уровне экосистемы, связанной с отдельным упавшим

деревом (Ulanova, 2000). Близкая по смыслу классификация предложена в обзоре (Mitchell, 2013) – выделены ветровалы, ведущие к смене древостоя (сукцессии) на уровне всего насаждения (сплошные), на уровне когорты или вывал отдельных деревьев. При этом отмечается, что сплошные ветровалы характерны чаще для одновозрастных насаждений, тогда как в естественном разновозрастном насаждении преобладают участки с различной степенью повреждения.

Европейским институтом леса используется классификация, по которой ветровалы делятся 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. 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.

В России помимо термина «ветровал» (англоязычный аналог «windthrow») широко применяется также термин «бурелом». В практике лесоведения и лесоводства буреломом называют участки леса, на которых деревья сломаны на различных высотах в результате воздействия сильного ветра (Реймерс, Яблоков, 1982). При этом термин «ветровал» будет иметь более узкое значение – выворачивание деревьев вместе с их корневой системой и комом земли, прилегающим к корням. В последние годы, когда для изучения нарушений лесного покрова стали широко применяться спутниковые снимки, эти явления обычно объединяются под термином «ветровал», поскольку различить характер повреждения деревьев по снимкам не представляется возможным (Петухов, 2016). При этом выделяют массовые (катастрофические) и единичные (групповые) вывалы (Скворцова и др., 1983), что аналогично европейской классификации (Gardiner et al., 2008).

Ветровалы оказывают разноплановое воздействие на лесные экосистемы. Хотя под воздействием сильных ветров находятся, прежде всего, деревья первого яруса, ветровалы также способствуют изменению лесных почв, напочвенного покрова, условий возобновления древостоя. Единичные и групповые ветровалы поддерживают разновозрастность древостоя, создают мозаичность и тем самым повышают устойчивость лесных экосистем (Скворцова и др., 1983; Восточноевропейские леса..., 2004). Особый интерес представляют так называемые эффекты взаимодействия (Seidl et al., 2017), когда ветровалы способствуют возникновению других видов нарушений или росту степени

повреждения древостоя от них. Известно, что на ветровалах формируются благоприятные условия для размножения стволовых вредителей, в частности короэда-типографа (Крылов, Владимирова, 2011). Также для ветровальных участков в первые годы после события характерно увеличение запаса легковоспламеняющихся лесных горючих материалов (Jenkins et al., 2014), что ведет к росту скорости распространения лесных пожаров и сложности их тушения (Скворцова и др., 1983; Everham, Brokaw, 1996). Возможны и обратные эффекты – например, на поврежденных насекомыми-вредителями участках леса повышается шероховатость полога, снижается прочность корневой системы или устойчивость стволов, что повышает подверженность таких участков ветровалам (Seidl et al., 2017).

Исследованию экологических эффектов ветровалов на уровне ландшафтов и сообществ посвящена обширная литература. Из ключевых работ российских авторов стоит выделить монографию (Скворцова и др., 1983), сборники (Сукцессионные процессы..., 1999; Восточноевропейские леса..., 2004), обзорную статью (Ulanova, 2000) и диссертацию Н.Г. Улановой (Уланова, 2006). Также опубликован ряд обзоров англоязычных публикаций по данному направлению (Everham, Brokaw, 1996; Quine, Gardiner, 2007; Mitchell, 2013; Seidl et al., 2017). Перечисленные аспекты изучения ветровалов, однако, не относятся к предмету рассмотрения в настоящей работе.

## **1.2. Ветровалы и другие нарушения лесного покрова в условиях современного изменения климата**

Изменение многолетнего режима нарушений лесного покрова в условиях современного глобального потепления представляет собой значимую научную проблему, которой посвящены сотни научных публикаций (Seidl et al., 2011, 2017). В последние десятилетия повторяемость нарушений, их интенсивность и степень повреждения лесов существенно изменяется по всему миру (Seidl et al., 2011, 2017; McDowell et al., 2020). Изменения не везде согласованы, но преобладают положительные тренды. Так, отмечается рост площади гибели лесов от пожаров на территории США (Westerling et al., 2006), и лесопокрываемых площадей, пройденных пожарами в России (Лупян и др., 2017). При этом в Европе за последние 30 лет статистически значимого увеличения площади потерь лесов от пожаров не отмечено (Senf, Seidl, 2021). В ряде регионов мира увеличиваются площади потерь лесов, вызванных биотическими факторами, что

также связывают с изменением климата (Kautz et al., 2017; Kharuk et al., 2021). Так, масштабное усыхание еловых лесов вследствие вспышек численности короеда-типографа и других вредителей наблюдалось в ряде стран Европы (Hlásny et al., 2021), на ЕТР (Крылов и др., 2011) и в Сибири (Kharuk et al., 2021). Растет роль засух как фактора гибели лесов (Millar, Stephenson, 2015). Площадь лесов, погибших от причин, связанных с засухами на территории Европы с 1986 по 2016 гг. оценивается в 500 тыс. га (Senf et al., 2020).

Аналогичные тенденции отмечаются и для ветровалов. Впервые статистически значимое увеличение площади ветровалов в лесах Западной, Центральной и Северной Европы было показано в работе (Schelhaas et al., 2003). Эта тенденция была подтверждена по результатам анализа многолетних баз данных, созданных лесохозяйственными службами отдельных стран Европы (Nilsson, 2004; Usbeck et al., 2010) и Европейским институтом леса (Gardiner et al., 2010). Полученные оценки нашли подтверждение в работах последних лет, в том числе на основе спутниковых данных Landsat за 1986–2016 гг. (Senf, Seidl, 2021б).

Причинами роста площади ветровалов в Европе являются, с одной стороны, изменения породного состава и возрастной структуры лесов – рост лесопокрытой площади в целом и хвойных насаждений в частности, увеличение среднего запаса древесины, а с другой стороны – изменение климата. В работе (Seidl et al., 2011б) показано, что ключевым фактором, определяющим восходящий тренд площади ветровалов в странах Европы, является изменение структуры лесов, а климатический фактор имеет вторичный характер. Однако этот вопрос остается дискуссионным, поскольку в работах (Usbeck et al., 2010; Gregow et al., 2017) был выявлен статистически значимый рост максимальных скоростей ветра и связанных с ним площадей ветровалов в странах Европы, который начался с 1990 г.

Возможное влияние глобального потепления на рост потерь лесов от ветровалов было впервые предсказано в работе (Overpeck et al., 1990). В последующие годы изучению связи изменения климата и нарушений лесного покрова (в том числе ветровалов) было посвящено множество исследований, обзор которых приведен в (Siedl et al., 2017). Было показано, что потепление может способствовать увеличению масштабов ветровалов как напрямую, за счет роста повторяемости и интенсивности штормовых событий и продолжительности сезона их возникновения, так и косвенно. Примером косвенного влияния потепления может быть рост подверженности лесов ветровалам вследствие сокращения периода промерзания почвы, что особенно

актуально для лесов Северной Европы (Suvanto et al., 2016; Venäläinen et al., 2020). Большое значение имеют также эффекты взаимодействия, прежде всего вспышки вредителей и болезней леса на участках, поврежденных ветровалами (Siedl et al., 2017).

В странах Европы ведущая причина возникновения ветровалов меняется в зависимости от их географического положения и климатических условий. Так, в Западной, Центральной и частично в Северной Европе основные площади ветровалов связаны с прохождением глубоких внетропических циклонов в холодный период года (зимних штормов). В межгодовом распределении площади ветровалов хорошо прослеживаются максимумы, связанные с зимними штормами 1990, 1999 и 2007 гг. (Senf, Seidl, 2021). В странах Восточной Европы роль зимних штормов как фактора возникновения ветровалов снижается, но растет роль конвективных шквалов (см. напр. Suvanto et al., 2016; Tazarek et al., 2019; Venäläinen et al., 2020).

Для территории Европы выделяют три основных климатических драйвера роста площади ветровалов в условиях современного потепления. К ним относятся возможное увеличение частоты и интенсивности зимних штормов (Gregow et al., 2017), а также ожидаемый аналогичный тренд для конвективных шквалов и смерчей в теплый период года (Overpeck et al., 1990; Diffenbaugh et al., 2013; Radler et al., 2019). Вероятное увеличение количества и интенсивности осадков при прохождении внетропических циклонов также может способствовать росту площадей ветровалов (Seidl et al., 2017; McDowell et al., 2020).

Вопрос об росте частоты и интенсивности зимних штормов остается спорным (Feser et al., 2014; Laapas, Venäläinen, 2017). Однозначных выводов об увеличении потерь лесов от шквалов и смерчей на территории Европы также пока не получено. Лишь в работе (Potarov et al., 2015) был показан статистически значимый рост площадей ветровалов в странах Восточной Европы (включая ЕТР), на основе спутниковых данных Landsat за 1985–2012 гг., который можно связать с конвективными явлениями. Однако эти оценки имели приближенный характер и могли содержать существенные неточности за период до 2000 г. из-за особенностей использованного архива спутниковых данных.

Таким образом, оценка влияния потепления климата на характеристики ветровалов на уровне макрорегионов требует дополнительных исследований, и прежде всего – создания многолетних и репрезентативных баз данных о ветровалах и вызывающих их штормовых событиях.

### Многолетние ряды данных о ветровалах в условиях изменения климата

Роль ветровалов как фактора нарушений лесного покрова существенно различается для разных регионов мира, в том числе в зоне лесов бореального и умеренного пояса. Для изучения многолетнего режима ветровалов и оценки их значимости в сравнении с другими факторами нарушений требуется многолетняя статистика, которая, однако, до недавнего времени была доступна лишь по немногим регионам мира, в частности для Зарубежной Европы. До 2010 г. информацию о ветровалах получали в основном из анализа литературы и отчетов лесохозяйственных служб, а в последние годы для этого стали активно использоваться спутниковые снимки.

Наиболее длительные ряды наблюдений за ветровалами (свыше 100 лет) были собраны в Швеции (Nilsson et al., 2004) и Швейцарии (Usbeck et al., 2010). В этих странах ветровалы являются основным природным фактором, вызывающим гибель лесов (Senf, Seidl, 2021б). Важнейшим этапом стала работа (Schelhaas et al., 2003), в которой были представлены оценки потерь лесов, вызванных природными факторами на территории большинства стран Европы (за исключением бывшего СССР). Для некоторых стран данные получены с 1850 г. Была показана ключевая роль ветровалов как фактора, вызывающего потери лесного покрова в Европе, а их вклад оценен в 53% всех потерь от природных факторов за период с 1950 по 1999 гг.

В 2010 г. для всей территории ЕС Европейским институтом леса была создана открытая база данных о разрушительных штормах в лесах Европы (Gardiner et al., 2010), с применением которой был проведен ряд дополнительных исследований (см. напр. Gregow et al., 2017). В 2020 г. опубликована новая база данных ветровалов в лесах Европы за период 2001–2018 гг., получившая название FORWIND (Forzieri et al., 2020). Она была собрана на основе данных 26 исследовательских институтов и лесохозяйственных служб различных стран Европы, и включает более 80 тыс. отдельных участков ветровалов. Большинство их относится к немногочисленным крупным ветровалам. Для ЕТР в этой базе данных информация крайне ограничена, представлены только смерчевые ветровалы, произошедшие в 2001–2014 гг. (Shikhov, Chernokulsky, 2018).

В последнее десятилетие ряд баз данных о ветровалах был создан на основе спутниковой информации. Первые подобные исследования выполнены в Канаде (Fraser, 2005). Однако полученные данные имели множество ограничений из-за низкого пространственного разрешения (около 1,1 км) использованных снимков SPOT-Vegetation. После появления в открытом доступе спутниковых

снимков миссии Landsat, на их основе было создано множество баз данных о ветровалах для различных регионов.

Наиболее полная и актуальная база данных ветровалов (наряду с другими факторами нарушений) в лесах Европы представлена в работах (Senf, Seidl, 2021a, б). Она включает свыше 36 млн. участков нарушений, но главной ее особенностью является наличие информации о степени повреждения древостоя (severity). Согласно этим данным, среднегодовая площадь ветровалов в Европе (за исключением ЕТР) составляет 127,7 тыс. га, или около 7% от всех потерь лесного покрова (Senf, Seidl, 2021б). Это в несколько раз выше аналогичной оценки для Восточной Европы за 1985–2012 гг. (Potapov et al., 2015). На фоне сильной межгодовой изменчивости, обусловленной зимними штормами в 1990, 1999 и 2007 гг., был подтвержден статистически значимый восходящий тренд площади ветровалов.

Для территории России в связи с отсутствием качественных данных о пространственном распределении ветровалов, оценки их вклада в общую площадь потерь лесного покрова до настоящего времени имели обобщенный характер. По данным, полученным за 2002–2011 гг. в целом по территории России 65,5% нарушений лесного покрова связаны с лесными пожарами, около 30% – с лесозаготовкой, а на прочие факторы (ветровалы и биотические факторы) приходится менее 5% (Krylov et al., 2014). Точная доля ветровалов в структуре нарушений лесного покрова не оценивалась.

Несколько более детальные оценки для ЕТР на основе снимков Landsat за период 1985–2012 гг. приведены в работе (Potapov et al., 2015). Установлено, что с пожарами на ЕТР связано 8,1% от общей площади потерь лесов, с ветровалами – 1,8%, а остальные 90,1% в основном приходятся на лесозаготовку. При этом за период 2007–2012 гг. доля пожаров увеличились до 11,3%, а ветровалов – до 3,6%. Результаты, полученные в работе (Potapov et al., 2015) согласуются с глобальной оценкой основных факторов потери лесного покрова на основе снимков Landsat (Curtis et al., 2018). Согласно этим данным, на большей части ЕТР преобладающим типом нарушений являются вырубки, в северной части Республики Коми – гари, а ветровалы нигде не являются преобладающим фактором.

Более детальные оценки вклада ветровалов в общую площадь потерь лесов имеются для отдельных регионов ЕТР. Так, для Пермского края, Свердловской и Челябинской областей была создана уникальная база данных, включающая зафиксированные метеостанциями штормовые события со скоростью порывов ветра  $\geq 20$  м/с (всего 317 событий) и связанные с ними ветровалы за период

1965–1996 гг. (Lassig, Mocalov, 2000). Информация о ветровалах была получена из отчетов лесничеств. Также исследования ветровалов, включающие сбор многолетних данных о них, проводились в ряде крупных заповедников на ЕТР, в частности в Центрально-Лесном и в Печоро-Илычском (Ulanova, 2000; Елсаков, Марущак, 2010).

В последнее десятилетие информация о ветровалах в лесах России стала более доступной благодаря появлению открытых архивов спутниковых данных. На основе архива снимков Landsat была создана картографическая база данных крупных ветровалов в Костромской области и прилегающих регионах за 1984–2011 гг. (Петухов, Немчинова, 2014; Петухов и др., 2016). На основе спутниковых данных Landsat и Sentinel-2 также созданы базы данных о ветровалах, представленные в настоящей работе. Краткая характеристика ранее опубликованных баз данных приведена в табл. 1.1.

Таблица 1.1  
Характеристика опубликованных многолетних баз данных о ветровалах

Территория исследования	Период исследования	Источники информации	Типы нарушений лесного покрова, включенные в базу данных, и их характеристики	Наличие данных о штормовых событиях, вызвавших ветровалы	Ссылка	Наличие данных в форматах ГИС
Базы данных, созданные на основе анализа литературы и отчетов лесохозяйственных служб						
Швеция	1901 – 2000	Отчеты Национального совета и региональных управлений по лесному хозяйству, научные публикации	Ветровалы (запас поврежденной древесины)	+	Nilsson et al., 2004	-
Швейцария	1858 – 2007	Отчеты национальной и региональных лесохозяйственных служб	Ветровалы (запас поврежденной древесины, степень повреждения),	+	Usbeck et al., 2010	-
Европа, за исключением бывшего СССР	1950 – 1999	Научные публикации	Ветровалы, гари, снеголомы повреждения биотическими факторами (площадь, запас поврежденной древесины)	-	Schelhaas et al., 2003	-

Территория исследования	Период исследования	Источники информации	Типы нарушений лесного покрова, включенные в базу данных, и их характеристики	Наличие данных о штормовых событиях, вызвавших ветровалы	Ссылка	Наличие данных в форматах ГИС
Европа, за исключением бывшего СССР	1950–2010	Данные Европейского института леса, полученные из национальных министерств и научных институтов	Ветровалы (запас поврежденной древесины, площадь)	+	Gardiner et al., 2010	-
Средний Урал и Предуралье.	1965–1996	Отчеты лесничеств	Ветровалы (запас поврежденной древесины, площадь)	+	Lassig, Mocalov, 2000	-
Восточный Квебек, Канада	1971–2000	Не указано	Ветровалы (запас поврежденной древесины, площадь, степень повреждения)	+	Bouchard et al., 2009	-
Европа (включая ЕТР)	2001–2018	Данные из национальных министерств и научных институтов	Ветровалы (запас поврежденной древесины, площадь, степень повреждения)	+	Forzieri et al., 2020	+
Базы данных, созданные на основе анализа спутниковых снимков						
Канада	1998–2004	Снимки SPOT-Vegetation (пространственное разрешение 1 км)	Все виды нарушений, включая ветровалы (площадь)	-	Fraser, 2005	-

Территория исследования	Период исследования	Источники информации	Типы нарушений лесного покрова, включенные в базу данных, и их характеристики	Наличие данных о штормовых событиях, вызвавших ветровалы	Ссылка	Наличие данных в форматах ГИС
ЕТР	2009–2010	Снимки Landsat	Крупные ветровалы (площадь)	–	Крылов и др., 2012	+
Восточная Европа, включая ЕТР	1985–2012	Снимки Landsat	Все виды нарушений, включая ветровалы	–	Rotarov et al., 2015	+
Костромская область	1984–2011	Снимки Landsat	Крупные ветровалы (геометрические характеристики)	–	Петухов, Немчинова, 2014	+
Европа (кроме ЕТР)	1986–2016	Снимки Landsat	Все виды нарушений, включая ветровалы (геометрические характеристики, степень повреждения древостоя)	–	Senf, Seidl, 2021b	+

Территория исследования	Период исследования	Источники информации	Типы нарушений лесного покрова, включенные в базу данных, и их характеристики	Наличие данных о штормовых событиях, вызвавших ветровалы	Ссылка	Наличие данных в форматах ГИС
Уральский регион между 50° и 70° в.д.	2000–2014	Снимки Landsat, данные GFC	Ветровалы, гари (геометрические характеристики)	+	Shikhov et al., 2019	+
Пермский край, Кировская обл. респ. Коми, Удмуртия	1985–2016	Снимки Landsat, данные GFC и Eastern Europe Forest Cover Change	Ветровалы, гари (геометрические характеристики)	+	Шихов, Зарипов, 2018	+
ЕТР	1986–2017	Снимки Landsat, Sentinel-2, данные GFC, EEFCC и др.	Ветровалы (геометрические характеристики)	+	Shikhov et al., 2020	+

Базы данных, опубликованные авторами, выделены серым цветом.

### 1.3. Основные факторы, определяющие подверженность лесов ветровалам

Изучению факторов, определяющих подверженность лесов ветровалам, а также оценке и моделированию подверженности лесов ветровалам и риска ветровалов посвящено множество публикаций во многих странах мира (Seidl et al., 2011; Mitchell et al., 2013). При расчете риска ветровалов традиционно учитываются параметры насаждений (forest), климатические переменные (climate) и факторы местоположения (landscape) (Forzieri et al., 2021).

Частота и интенсивность явлений, вызывающих ветровалы, определяется на основе кривой обеспеченности максимальной скорости ветра, по данным метеостанций или по реанализу (Venäläinen et al., 2020). В свою очередь, для оценки подверженности и экспозиции рассматривают три группы факторов – характеристики насаждений, факторы местоположения и практика лесопользования (Seidl et al., 2011; Mitchell, 2013; 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 (Peltola et al., 1999; Dobbertin, 2002; Seidl et al., 2011; Hanewinkel et al., 2014). В частности, подверженность ветровалам значительно возрастает для хвойных лесов в сравнении с лиственными, также она увеличивается в насаждениях с однородной возрастной структурой (Mitchell, 2013) и на участках, где искусственно снижена полнота древостоя (Suvanto et al., 2019).

Ключевыми факторами местоположения являются рельеф, мощность почвенного профиля, механический состав и влажность почвы (Dobbertin, 2002; Schindler et al., 2012), близость открытых пространств и водоемов (Peltola et al., 1999; Suvanto et al., 2016). Известно, что подверженность лесов ветровалам увеличивается на наветренных склонах, на маломощных каменистых почвах и при высокой влажности почвы, а при промерзании почвы напротив, значительно снижается.

Характер лесопользования существенно влияет на подверженность лесов ветровалам, прежде всего на локальном уровне, за счет появления новых открытых пространств внутри лесного массива при сплошных рубках или прореживания древостоя при выборочных рубках (Peltola et al., 1999). В частности, для оценки подверженности ветровалам лесов Финляндии как отдельный параметр учитывалось соседство со свежей вырубкой или иным

нарушением лесного покрова (new open area proximity) (Suvanto et al., 2016, 2019). Важность этого параметра обусловлена тем, что деревья, оказавшиеся вблизи границы нового открытого участка, не адаптированы к более сильным ветрам, в результате чего вероятность их слома или вывала увеличивается.

Количественная оценка перечисленных факторов является основой моделирования подверженности лесов ветровалам. Широко применяются два основных подхода к решению этой задачи – статистический и механистический (Seidl et al., 2011).

Статистический подход основан на оценке зависимостей подверженности ветровалам от вышеперечисленных факторов, рассматриваемых как независимые переменные. В рамках него применяются 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). Модели, разработанные в рамках статистического подхода, в большинстве случаев обеспечивают точность прогнозирования участков возникновения ветровалов на уровне 70–75% (Seidl et al., 2011). Для повышения точности применяются как разные варианты классификаторов, так и оригинальные подходы к подготовке входных данных. В моделях используются высокодетальные данные о характеристиках насаждений, полученные путем воздушного лазерного сканирования (Saarinen et al., 2016), что позволило повысить пространственное разрешение моделей и уточнить зависимости возникновения ветровалов от различных факторов. Так, для территории Финляндии расчет подверженности лесов ветровалам выполнен на основе данных инвентаризации лесов с шагом сетки 10 м (Suvanto et al., 2019).

Второй подход основан на использовании механистических моделей деревьев для оценки риска для каждого дерева (Gardiner et al., 2008). Одна из первых подобных моделей (HWIND) была разработана в Финляндии (Peltola et al., 1999). Модель позволяет определить критическую скорость ветра, при которой происходит падение деревьев и риск ветровала для определенной территории. Такой подход является физически более обоснованным, однако его практическое применение пока ограничивается монокультурными и однородными по возрасту насаждениями (плантациями). В научных исследованиях модель HWIND получила достаточно широкое применение, в частности при моделировании распределения скорости ветра в смерче (Beck, Dotzek, 2010). Разрабатываются различные варианты совершенствования механистических моделей, в частности их комбинирование с моделями роста

деревьев (Albrecht et al., 2015), что позволяет расширить возможности их применения для сложных естественных насаждений.

Для практической реализации любого из перечисленных методов необходимы детальные пространственные данные о характеристиках насаждений и условиях их произрастания. Для территории России их получение часто является существенной проблемой. Также недоступна необходимая для моделирования информация о характеристиках лесных почв. 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 (Ulanova, 2000; Алесенков и др., 2006; Петухов, 2016), либо с применением открытых спутниковых данных, карт растительности и цифровых моделей рельефа (Петухов, 2016; Шихов и др., 2019, Шихов, Дремин, 2021). Исключением можно считать работу (Lässig, Močálov, 2000), в которой проанализировано распределение ветровалов в зависимости от таксационных характеристик насаждений (полученных по данным лесоустройства), и в целом были подтверждены закономерности, выявленные ранее для смешанных лесов Европы.

### **Долгосрочный прогноз риска ветровалов в изменяющемся климате**

Долгосрочный прогноз риска ветровалов предполагает определение всех трех составляющих риска и их взаимодействия. Необходимо учитывать не только ожидаемые изменения климата, но и связанные с ним изменения породного состава и структуры лесов. Увеличению риска ветровалов при дальнейшем потеплении климата способствуют рост количества осадков в бореальной зоне, сокращение периода промерзания почвы (Venäläinen et al., 2020), рост интенсивности конвективных явлений и увеличение продолжительности их сезона (Diffenbaugh et al., 2013; Saad et al., 2017).

Существующий подход к долгосрочному прогнозу риска ветровалов заключается в комбинированном использовании климатических проекций этих переменных на XXI век (полученных по глобальным или региональным моделям климата) и моделей для расчета риска ветровала. Подобная оценка с применением механистических моделей была получена, в частности, для территории Канады (Saad et al., 2017) и Финляндии (Ikonen et al., 2017). Также применяются статистические модели риска ветровала в комбинации с климатическими моделями (Takano et al., 2016). Перечисленные исследования в основном подтверждают вероятное увеличение риска ветровалов в будущем, на фоне глобального потепления.

## **ГЛАВА 2**

# **ИДЕНТИФИКАЦИЯ И КАРТОГРАФИРОВАНИЕ ВЕТРОВАЛОВ**

### **2.1. Методы идентификации ветровалов и оценки их характеристик по данным дистанционного зондирования Земли**

#### **Идентификация ветровалов по спутниковым снимкам среднего пространственного разрешения**

Основным источником информации о нарушениях лесного покрова (в том числе о ветровалах) в настоящее время являются данные дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ), и в частности спутниковый мониторинг. Рост доступности спутниковых снимков обеспечивает получение все более оперативной и детальной информации о ветровалах и как следствие – о вызывающих их метеорологических явлениях.

Методы идентификации ветровалов по космическим снимкам в основном аналогичны тем, которые применяются для выявления других видов нарушений лесного покрова. Они разрабатываются практически с момента появления первых цифровых снимков Земли из космоса. Первая работа по применению спутниковых снимков для анализа ветровалов, вызванных смерчами, была опубликована всего через три года после запуска спутника Landsat-1 с радиометром MSS (Sayn-Wittgenstein, Wightman, 1975). Однако широкое применение спутниковых снимков для мониторинга ветровалов долгое время было невозможно по причине низкой повторяемости съемки и платного доступа к данным. Лишь после открытия многолетнего архива данных Landsat в 2008 г. началось интенсивное развитие исследований по данной тематике, как и по другим смежным направлениям (Wulder et al., 2012).

Традиционные методы мониторинга нарушений лесного покрова разработаны на примере данных сенсоров TM и ETM+, установленных на спутниках серии Landsat. В частности, по ним была установлена высокая информативность данных в средней инфракрасной (SWIR) зоне спектра для решения этой задачи. При повреждении растений отражательная способность в

зоне SWIR значительно возрастает, что связано с падением содержания влаги в поврежденных деревьях. Также из-за снижения фотосинтеза растет отражение в красной зоне и снижается – в ближней инфракрасной (ИК) зоне (Барталев и др., 2010; Крылов, Владимирова, 2011).

На этих спектральных свойствах основаны разнообразные вегетационные индексы, в частности нормализованный индекс инфракрасной разности NDII (Hardisky et al., 1983), который в русскоязычной литературе имеет название SWVI (Барталев и др., 2010), а также нормализованный разностный индекс гарей NBR (Cocke et al., 2005). Они являются наиболее простыми и часто используемыми при идентификации ветровалов (Крылов, Владимирова, 2011; Петухов, 2016). Ветровалы, как и другие нарушения лесного покрова, выделяются по разности этих индексов, вычисленной по разновременным снимкам, полученным до и после события. Спектральные индексы, использующие каналы диапазона SWIR, существенно более эффективны для выявления ветровалов, чем нормализованный разностный вегетационный индекс NDVI (Wang et al., 2010; Крылов, Владимирова, 2011).

В ряде работ рассматривалось применение более сложных индексов, чем простые нормализованные разности. К ним относятся как индексы, основанные на видимом и ближнем ИК диапазонах спектра (SAVI и др.), так и использующие средний ИК диапазон, а также результаты преобразования Tasseled Cap (Crist et al., 1986). В работе (Wang, Xu, 2010) на примере ущерба от урагана Катрина в США был проведен сравнительный анализ эффективности различных вегетационных индексов и ряда других методов обнаружения изменений по снимкам Landsat. Установлено, что наибольшую точность обеспечивает преобразование Tasseled Cap Wetness, в котором используются 6 каналов съемочной системы TM/Landsat с разными весами, причем с максимальным весом – средний ИК канал.

Для идентификации ветровалов по одиночным снимкам в ряде работ применяется индекс нарушенности (Disturbance Index), основанный на преобразовании Tasseled Cap (Baumann et al., 2014). Он также рассчитывается в автоматическом режиме по спутниковым данным MODIS (Mildrexler et al., 2009), и может использоваться для глобальных оценок нарушенности лесов.

Помимо вегетационных индексов, идентификация нарушений лесного покрова по снимкам оптического диапазона выполняется с применением ряда альтернативных методов, которые также используют только спектральные признаки. К ним относятся метод многомерного обнаружения изменений (Nielsen et al., 1998), выборочный анализ главных компонент (Coppin, Bauer,

1994), метод анализа векторов изменений (Allen, Kupfer, 2001) и сравнение результатов классификации разновременных снимков. Преимущества и ограничения этих методов для обнаружения ветровалов показаны в работе (Wang, Xu, 2010).

Современным и эффективным методом обнаружения изменений лесного покрова является построение деревьев решений. Именно такой метод на основе многолетнего ряда снимков Landsat, полученных за вегетационный период, был использован при создании продукта Global Forest Change (Hansen et al., 2013).

Некоторые проблемы применения вегетационных индексов и других традиционных пороговых методов для обнаружения ветровалов обозначены в работе (Крылов, Владимирова, 2011). Во-первых, при использовании любого метода необходимо предварительно исключить нелесопокрытые территории, чтобы избежать ложного детектирования изменений на таких участках. Во-вторых, по данным Landsat успешно выделяются лишь относительно крупные сплошные ветровалы (площадью от 2–3 га), а для обнаружения локальных повреждений требуются снимки более высокого пространственного разрешения. Также при использовании перечисленных методов определенной проблемой является подбор пороговых критериев, позволяющих разделить здоровые и погибшие насаждения. Значения этих критериев будут различаться для каждой пары снимков в связи с различными условиями съемки (сезонными факторами, состоянием атмосферы).

Однако основной проблемой в дешифрировании ветровалов по снимкам Landsat и Sentinel-2 является автоматизация их отделения от других видов нарушений лесного покрова (прежде всего от вырубок), поскольку ветровалы и вырубки часто имеют близкие спектральные характеристики. В работе (Baumann et al., 2014) был предложен алгоритм автоматизированного разделения ветровалов и вырубок на основе одиночного снимка Landsat и нового индекса, производного от индекса нарушенности DI. Точность разделения составила около 77%, что недостаточно для использования предложенного метода на практике. Основными признаками, позволяющими отличить ветровалы от других типов нарушений лесного покрова, являются не спектральные, а геометрические: большая протяженность, линейная или веерная пространственная структура, отсутствие прямых углов (Shikhov, Chernokulsky, 2018; Shikhov et al., 2020a). Поэтому до недавнего времени распознавание типов нарушений проводилось визуально, либо с применением дополнительных признаков (как, например, данные о тепловых аномалиях – для гарей). Этот подход сохраняет свое

значение, в том числе он был применен и в наших исследованиях. Однако с повышением пространственного и временного разрешения спутниковых данных необходимость в автоматизации возрастает.

Разработка алгоритмов для автоматической классификации нарушений лесного покрова по типам (вырубки, гари, ветровалы, усыхание леса) является одной из важнейших задач мониторинга лесного покрова (Huo et al., 2019). Исследования в этом направлении выполняются с применением различных подходов и исходных данных, в том числе общедоступных снимков Landsat, Sentinel-2 и продуктов их обработки. Однако полученные результаты часто характеризуются высокой неопределенностью, особенно в случае взаимного перекрытия в пространстве различных типов нарушений (McDowell et al., 2015; Anderegg et al., 2020).

Первые попытки автоматической классификации нарушений лесного покрова по типам были основаны на совместном использовании спектральных, геометрических признаков и данных о рельефе. Для лесных регионов, где преобладают обширные по площади нарушения, в частности связанные с пожарами, рубками или масштабными вспышками вредителей, такой подход оказывается результативным, в частности для Канады (Hermosilla et al., 2015) и США (Kennedy et al., 2015; Schroeder et al., 2017). На территории США точность распознавания типов нарушений достигала 80% и выше (Schroeder et al., 2017; Huo et al., 2019).

Важным предиктором, позволяющим уточнить причину нарушения, является время его появления, поскольку лесные пожары, шквалы и смерчи, вспышки численности насекомых-вредителей имеют выраженную сезонность. Информация о дате нарушений может быть получена на основе ряда спутниковых снимков и затем уточнена по дополнительным источникам (Shikhov et al., 2020). В работе (Oeser et al., 2017) предложен подход к классификации причин нарушений лесного покрова, основанный на временном ряде снимков Landsat с учетом дополнительных предикторов – дат возникновения нарушения и близости их по времени к штормовому событию (для выделения ветровалов). Точность классификации нарушений с применением данного алгоритма составила 75–86%.

Ряд сложностей возникает при применении перечисленных подходов для районов с преобладанием небольших по площади участков повреждений лесов, или для выделения повреждений, вызванных последовательным действием нескольких факторов (Senf et al., 2017; Senf, Seidl, 2021a). Это связано, в

частности, с практикой оперативного проведения санитарных рубок на участках поврежденных лесов пожарами, ветровалами или вредителями, что искажает их спектральные и геометрические характеристики (Thorn et al., 2017; Senf et al., 2017). Для минимизации этих ограничений, предложен подход к выявлению типа нарушения с применением новой метрики – ландшафтного контекста, т.е. анализ пространственно-временных взаимосвязей каждого участка нарушений с другими участками на окружающей местности. С применением данного подхода удалось повысить общую точность распознавания причин гибели лесов (ветровалов, вырубок и вспышек размножения вредителей) на 26% (Sebald et al., 2021). Также перечисленные подходы для распознавания типов нарушений лесного покрова по спутниковым снимкам имеют региональные особенности, точность распознавания может существенно снижаться при их применении для участков с разнообразным породно-возрастным составом и характером лесопользования (Huo et al., 2019).

#### **Тематические продукты, созданные на основе данных Landsat**

В 2013 г. группой исследователей из Мэрилендского университета были опубликованы результаты проекта Global Forest Change (GFC) по картографированию нарушений лесного покрова Земли с детальностью 30 м на основе снимков Landsat за 2001–2012 гг. (Hansen et al., 2013). Актуальная версия продукта по состоянию на 2022 г. доступна по ссылке (Global Forest Change, 2021). На основе архива снимков Landsat также был создан информационный продукт Eastern'Europe Forest Cover Change, содержащий данные о нарушениях лесного покрова в Восточной Европе и на ЕТР за 1985–2012 гг. (Potarov et al., 2015).

Результаты проекта GFC используются исследователями по всему миру следующим образом: 1. Для оценки вклада различных факторов в общую площадь потерь лесного покрова (Curtis et al., 2018); 2. Как исходные данные для алгоритмов по распознаванию типов нарушений лесного покрова (Huo et al., 2019); 3. Как независимый источник для верификации баз данных о ветровалах (Forzieri et al., 2020); 4. Для определения площади ветровалов от отдельных штормовых событий (Taszarek et al., 2016; Korznikov et al., 2019).

В целом публикация тематических продуктов о нарушениях лесного покрова на основе снимков Landsat значительно упростила создание многолетних баз данных о гибели лесов от пожаров (Krylov et al., 2014), ветровалов (Shikhov et al., 2020) и обоих типов явлений (Шихов, Зарипов, 2018; Shikhov et al., 2019). Первая предварительная оценка вклада крупных ветровалов в структуру

нарушений лесного покрова в Восточной Европе за 1985–2012 гг. также была получена на основе автоматизированной обработки многолетних данных Landsat (Potapov et al., 2015).

### **Применение данных дистанционного зондирования Земли высокого пространственного разрешения**

В последнее десятилетие резко выросла доступность различных источников данных высокого пространственного разрешения – спутниковых снимков, данных аэрофотосъемки и воздушного лазерного сканирования. Это позволяет решать ряд новых задач в исследовании ветровалов – от их идентификации и оценки степени повреждения древостоя – до определения экономического ущерба или анализа характеристик метеорологических явлений, вызвавших ветровалы.

Снимки сверхвысокого разрешения (1 м и детальнее) ранее использовались чаще всего для валидации результатов автоматизированного дешифрирования по снимкам среднего разрешения, причем их обработка осуществлялась вручную (Королева, Ершов, 2012). В последние годы активно разрабатываются способы автоматизации дешифрирования ветровалов по снимкам с детальностью выше 10 м. Так, предложен алгоритм идентификации ветровалов по снимкам RapidEye, основанный на классификации методом Random Forest для выделения сравнительно крупных ветровалов и комбинированном методе анализа изменений – для выделения локальных участков (Einzmann et al., 2017). Решение подобной задачи по снимкам Formosat описано также в работе (Chehata et al., 2014). Развитие технологий искусственного интеллекта открывает новые возможности автоматизации анализа снимков сверхвысокого разрешения. Так, весьма перспективны алгоритмы на основе сверточной нейронной сети архитектуры U-net. Они обеспечивают точность распознавания ветровалов и участков леса, поврежденных короедом-типографом, по снимкам с пространственным разрешением 0,5 м до 90–94% (Kislov, Korznikov, 2020; Kislov et al., 2021).

Анализ спутниковых снимков с детальностью 2 м и выше позволяет также выделить отдельные поваленные деревья и определить тип метеорологического явления, вызвавшего ветровал. На этой основе была разработана и авторская методика идентификации шкваловых и смерчевых ветровалов (Shikhov, Chernokulsky, 2018; Shikhov et al., 2020), которая подробнее описана во второй главе монографии.

Для изучения ветровалов на детальном уровне широко применяются

данные аэрофотосъемки и съемки с беспилотных летательных аппаратов (БПЛА). Высокое пространственное разрешение позволяет использовать их для расчета запаса древесины на ветровальных участках (Pirotti et al., 2016), и для определения степени повреждения лесного покрова ветром (Cannon et al., 2016). В странах Европы разрабатываются и оперативные системы мониторинга ветровалов на основе съемки с БПЛА (Mokroš et al., 2017).

Съемка с БПЛА нашла широкое применение также для оценки характеристик метеорологических явлений, вызвавших ветровалы. Ортофотопланы, полученные по данным с БПЛА, используются для расчета интенсивности смерчей (Godfrey, Peterson, 2017), моделирования поля ветра в смерче (Beck, Dotzek, 2010), оценки ущерба от сильных шквалов и смерчей (Rodríguez, Bech, 2020) и уточнения климатологии смерчей в отдельных регионах (Rodríguez et al., 2021).

### **Организация дистанционного мониторинга ветровалов в России**

В России мониторинг ветровалов, как и других нарушений лесного покрова (в частности, связанных с воздействием биотических факторов), осуществляется в рамках государственного лесопатологического мониторинга (ГЛПМ) и регламентируется нормативными актами Министерства природных ресурсов и экологии РФ (Приказ..., 2017; Приказ..., 2020). ГЛПМ представляет собой систему наблюдений с использованием наземных и (или) дистанционных методов за санитарным и лесопатологическим состоянием лесов и за происходящими в них процессами и явлениями, а также анализа, оценки и прогноза изменения санитарного и лесопатологического состояния лесов. ГЛПМ является частью государственного экологического мониторинга. Ведение ГЛПМ возлагается на государственные органы управления лесным хозяйством, ФБУ «Рослесозащита» и его структурные подразделения – центры защиты леса в регионах РФ (Приказ..., 2017).

ГЛПМ производится на основе комплекса наземных и дистанционных методов. Дистанционные наблюдения за санитарным и лесопатологическим состоянием лесов проводятся с целью выявления изменений их состояния, предварительного определения границ и площади погибших и поврежденных лесных насаждений путем дешифрирования материалов космической съемки и аэрофотоснимков. Результатами дистанционных наблюдений являются специальные карты с выявленными изменениями в санитарном и лесопатологическом состоянии лесов и отчет о площади лесных насаждений, на которых обнаружены эти изменения. Требования к пространственному

разрешению снимков, минимальной площади выявляемых изменений и масштабу картографических материалов закреплены нормативными документами МПР РФ (Приказ..., 2017). В частности, масштаб картографических материалов с отображением контуров лесных насаждений с выявленными изменениями в санитарном и лесопатологическом состоянии должен быть не мельче 1:50 000 для защитных и эксплуатационных лесов и не мельче 1:100 000 для резервных лесов, а рекомендуемое пространственное разрешение снимков составляет от 1 до 30 м.

Согласно нормативным документам МПР РФ (Приказ..., 2020), акты лесопатологического обследования (в том числе по ветровалам) должны размещаться на официальных сайтах уполномоченных органов государственной власти или местного самоуправления. Однако в настоящее время эти материалы в форматах, поддерживаемых ГИС в открытом доступе отсутствуют. Информация о результатах лесопатологического мониторинга, в том числе о площади отдельных ветровалов может публиковаться на интернет-ресурсах региональных подразделений ФБУ «Рослесозащита» (Российский центр защиты леса..., 2021) в сообществах в социальных сетях (см. напр. Центр защиты леса..., 2017), в деловых СМИ (Чабак, 2011) или в нормативных актах субъектов РФ (Схема размещения..., 2020). Также суммарные оценки площади ветровалов за год по субъектам РФ публикуются в ежегодных государственных докладах о состоянии и охране окружающей среды субъектов РФ (см. напр. Доклад..., 2011, Доклад..., 2012). Все эти публикации являются ценными источниками дополнительной информации о ветровалах, в том числе для верификации оценок площади, полученных по спутниковым снимкам.

### **Оценка характеристик метеорологических явлений, вызывающих ветровалы**

Данные о ветровалах, получаемые главным образом дистанционными методами, являются ценнейшим источником информации о случаях шквалов, смерчей и сильных ветров, и используются для анализа интенсивности и пространственно-временного распределения этих явлений. Первые попытки использовать данные о ветровалах для выявления случаев смерчей были предприняты еще в середине XX века. Так, Л.П. Вознячук отмечал, что в лесной зоне Европейской части СССР и Сибири по данным лесничеств неоднократно отмечались ветровалы, вызванные смерчами, ширина которых составляла обычно 10–100 м, но в некоторых случаях достигала 400 м (Вознячук, 1954).

Интересные сведения о ветровалах, вызванных некоторыми штормовыми

событиями в пределах бывшего СССР, приведены в работе (Рожков, Козак, 1989). Так, площадь ветровалов, вызванных разрушительными шквалами и смерчами 9 июня 1984 г. в центральных областях ЕТР была оценена в 11 тыс. га (без детализации по регионам). Данная оценка была получена на основе информации от лесохозяйственных служб, и, вероятно, включала не только сплошные ветровалы. Позднее ветровалы от данной вспышки смерчей были проанализированы нами по снимкам Landsat (Chernokulsky, Shikhov, 2018). Было выявлено 8 смерчевых ветровалов на общей площади 3700 га, причем число случаев смерчей оказалось выше, чем по ранее опубликованным данным (Снитковский, 1987; Finch, Vikos, 2012).

В работе (Рожков, Козак, 1989) рассмотрены и другие крупные ветровалы. Отмечен случай катастрофического ветровала, вызванного шквалом 7 июня 1985 г. на Северном Урале, в результате которого были повреждены леса на площади 260 тыс. га, а запас поврежденного леса оценен в 22 млн. м<sup>3</sup>. Данное событие упоминается как один из двух крупнейших ветровалов на Урале за период 1965–1996 гг., однако дополнительной информации о самом явлении приведено не было (Lassig, Mocalov, 2000).

Развитие технологий ДЗЗ открыло новые возможности изучения ветровалов на удаленных и труднодоступных территориях, а также связанных со штормовыми событиями, которые не были зафиксированы метеостанциями. Спутниковые снимки были впервые использованы для идентификации смерчевых ветровалов в 1975 г. в Канаде (Sayn-Wittgenstein, Wightman, 1975), всего через три года после запуска первого спутника серии Landsat. Одно из первых исследований ветровалов по аэрофотоснимкам выполнено в Южной Америке (Dyer, 1988). В данной работе несколько крупных ветровалов были обнаружены по снимкам Landsat, детально проанализированы по аэрофотоснимкам и идентифицированы как смерчевые.

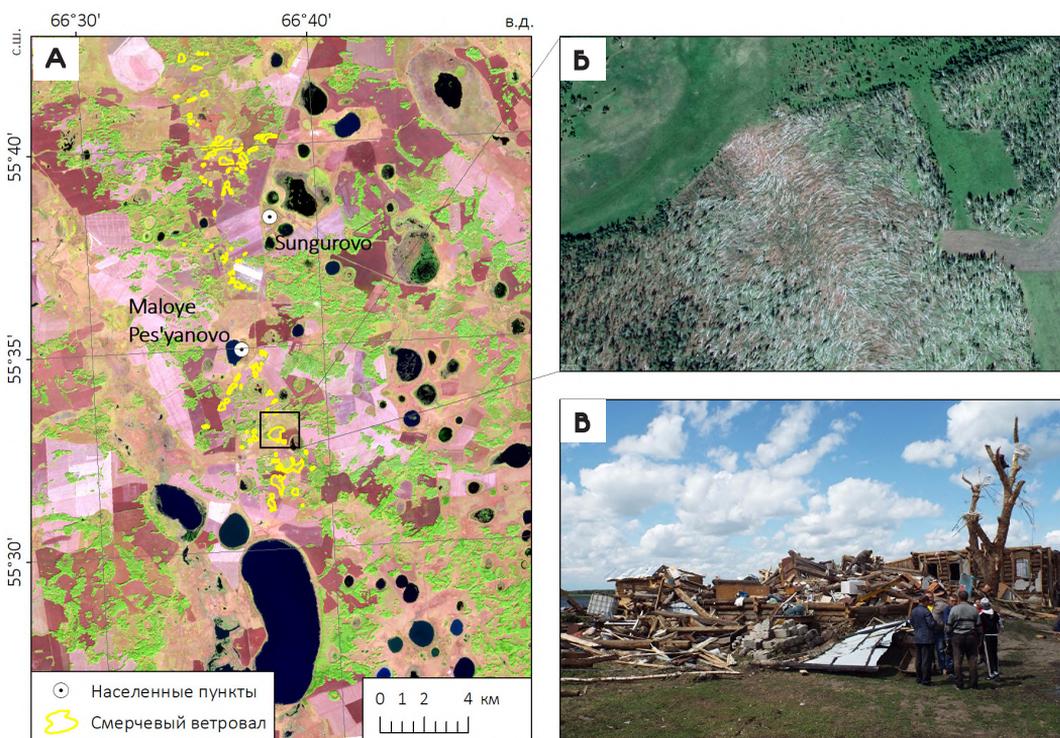
В США с 2006 г. спутниковые снимки Terra/Aqua MODIS использовались для анализа характеристик полос разрушений от наиболее сильных смерчей (Jedlovec et al., 2006). После катастрофической вспышки торнадо на юго-востоке США 27 апреля 2011 г., по снимкам Terra/Aqua MODIS, Landsat 7 ETM+ и Terra Aster были уточнены треки прохождения смерчей в визуальном режиме и на основе разности NDVI. Впервые были сопоставлены оценки их длины и ширины, выполненные по спутниковым снимкам и наземным обследованиям. Наилучшая согласованность этих оценок была отмечена в тех случаях, когда смерчи проходили над лесопокрытой территорией и вызвали ветровал (Molthan et al., 2014).

Другими авторами рассмотрены различные методики анализа снимков среднего разрешения (разности вегетационных индексов, управляемая, неуправляемая и объектно-ориентированная классификация) для повышения точности выделения полос разрушений, вызванных смерчами (Yuan et al., 2002; Myint et al., 2008). Проанализированы случаи прохождения смерчей над сельской местностью, над лесами и городской застройкой и показано, что на основе разности NDVI, полученной по снимкам до и после события, возможно выявить полосу повреждений от смерча, даже если его интенсивность составляла всего F1 по шкале Фуджита. В этих работах рассматривались известные случаи смерчей, и по снимкам уточнялись их длина, ширина трека и характер нанесенного ущерба.

В последние годы важнейшей тенденцией в исследованиях ветровалов стало широкое применение съемки с БПЛА для их оперативного выявления, анализа степени повреждения древостоя и направления повала деревьев, а также оценки интенсивности явлений, вызвавших ветровал (Wagner et al., 2019). Еще до широкого распространения БПЛА, аэрофотосъемка ветровалов применялась в работах по моделированию поля скорости ветра в смерчах. Так, в работе (Bech et al., 2009) было проведено моделирование развития смерча с помощью простой аналитической модели вихря и определены характерные признаки ущерба для древостоя при смерче интенсивностью F0, F1 и F2 по шкале Фуджита (Fujita, 1981). В работе (Beck, Dotzek, 2010) для решения аналогичной задачи применялась более сложная механистическая модель HWIND (Peltola et al., 1999), позволяющая рассчитать вероятность падения для каждого дерева. При этом в качестве входной информации также использовались данные о направлении падения деревьев и степени повреждения, полученные по аэрофотоснимкам, а неопределенность оценки максимальной скорости ветра составила  $\pm 6,0$  м/с.

В разрабатываемой Международной шкале Фуджита (The International Fujita Scale, 2021) предложен ряд индикаторов, позволяющих оценить интенсивность смерча по характеру повреждения древостоя. Для этого распространенные породы деревьев классифицированы на две группы – с высокой и низкой устойчивостью (твердостью древесины), причем почти все породы, характерные для лесной зоны ЕТР, относятся ко второй группе. К индикаторам интенсивности смерча относятся такие признаки, как соотношение сломанных и поваленных деревьев (слом деревьев указывает на более высокую скорость ветра), деревья, оставшиеся без ветвей, сорванная кора с деревьев (что указывает на интенсивность  $\geq F3$ ). Перечисленные критерии оцениваются на основе наземных

обследований или высокодетальной аэрофотосъемки. Согласно данной шкале, сплошное повреждение древостоя для древесных пород с низкой твердостью древесины указывает на интенсивность смерча  $\geq F1$ , т.е. с максимальной скоростью ветра  $\geq 33$  м/с. В США аналогичные критерии применяются и при оценке интенсивности шквалов, вызвавших ветровалы, согласно улучшенной шкале Фуджита (Wind Science..., 2021). В России перечисленные индикаторы использовались, в частности, для оценки интенсивности смерчей в июне 2017 г. в Зауралье (рис. 2.1). Альтернативный подход предложен в работе (Godfrey, Peterson, 2017), авторами которой интенсивность смерча оценивалась на основе доли поваленных деревьев по аэрофотоснимкам. Для территории России этот подход дает существенное завышение интенсивности смерчей (Chernokulsky et al., 2020b).



**Рис. 2.1.** Материалы для оценки интенсивности смерча 18.06.2017 г. Курганской области: общий вид ветровала на снимке Landsat (а), фрагмент снимка сверхвысокого пространственного разрешения с сервисов Google (б) и фото разрушений в дер. Малое Песьяново, в том числе деревья, лишенные коры (Chernokulsky et al., 2020b).

Съемка с БПЛА также широко применяется в рамках проекта «Northern Tornadoes» по изучению климатологии смерчей в Канаде (Sills et al., 2020). В рамках данного исследования, начатого в 2019 г., были получены детальные данные о каждом случае смерча на территории Канады на основе спутниковой съемки, аэрофотосъемки и анализа ущерба.

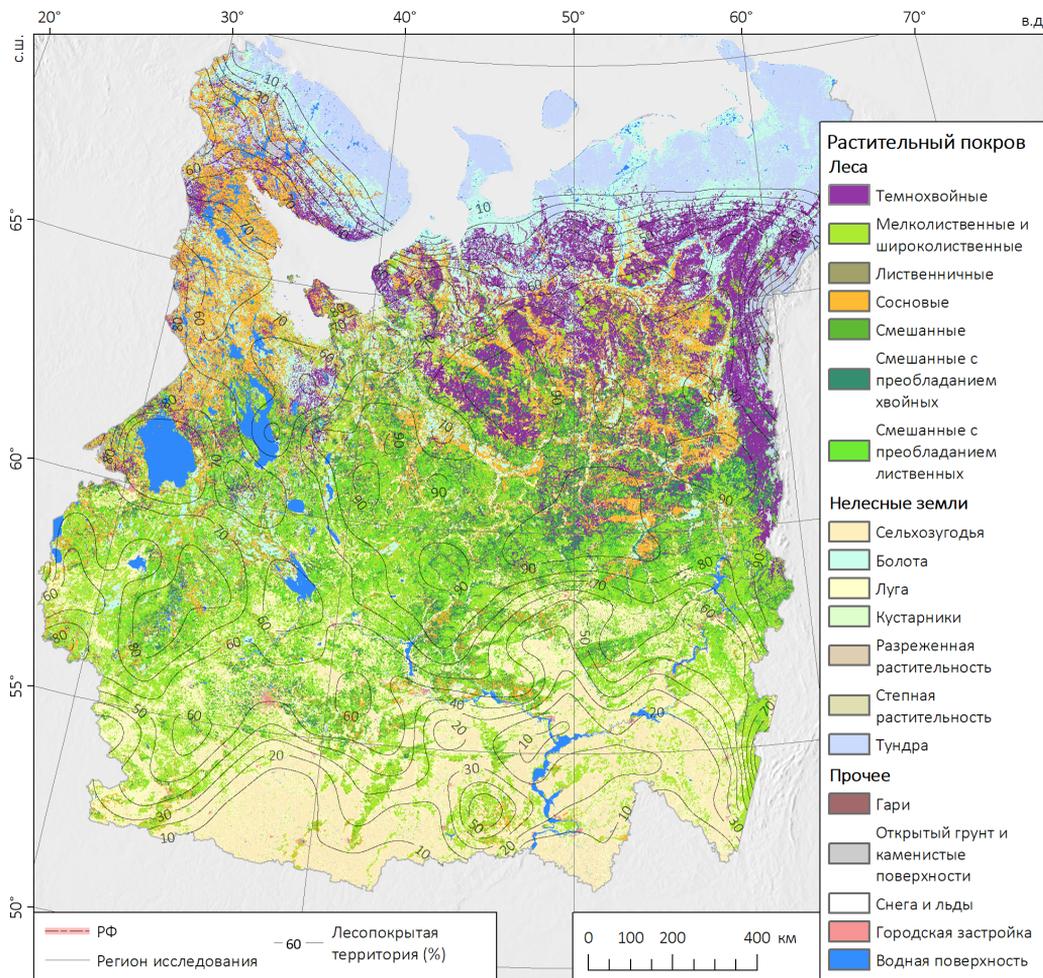
## **2.2. Характеристика территории исследования и исходных материалов**

В настоящей работе рассматриваются ветровалы в лесной зоне ЕТР, а также Западной и Центральной Сибири. Западная граница исследуемой территории совпадает с государственной границей РФ, восточная – с соответствующими границами субъектов РФ, входящих в Сибирский Федеральный округ (Красноярского края и Иркутской области). С севера исследуемая территория ограничена распространением высокоствольных лесов, в которых возможны ветровалы, а с юга – уменьшением лесистости в лесостепной зоне. Северная и южная границы были определены на основе данных о площади лесопокрытой территории (Барталев и др., 2011, 2016). Граница ЕТР и Сибири проведена в соответствии с доступностью данных ЕЕФСС, и совпадает не с географической границей Европы и Азии, а с восточными административными границами (Республики Коми, Пермского края и республики Башкортостан).

Леса исследуемой территории в основном относятся к таежной зоне, в пределах которой выделяются подзоны северной, средней и южной тайги. На ЕТР также широко представлены смешанные и широколиственные леса (Восточноевропейские леса..., 2004). Доля лесопокрытой территории в лесной зоне ЕТР в среднем составляет около 55%, достигая 90% и более в отдельных районах Республики Коми, Кировской области и Пермского края (рис. 2.2). Таежная зона Западной Сибири характеризуется значительно меньшей долей лесопокрытой территории, чем на ЕТР, в связи с широким распространением болот. В северотаежной подзоне Западной Сибири лесистость составляет менее 30%. В Центральной Сибири она снова увеличивается, до 90–95% вдоль Енисейского края.

На ЕТР свыше 60% территории покрывают вторичные (восстановившиеся на разновозрастных вырубках и гарях) смешанные и мелколиственные леса. Первичные темнохвойные леса распространены на западных склонах Северного Урала, а также в Архангельской области в междуречье

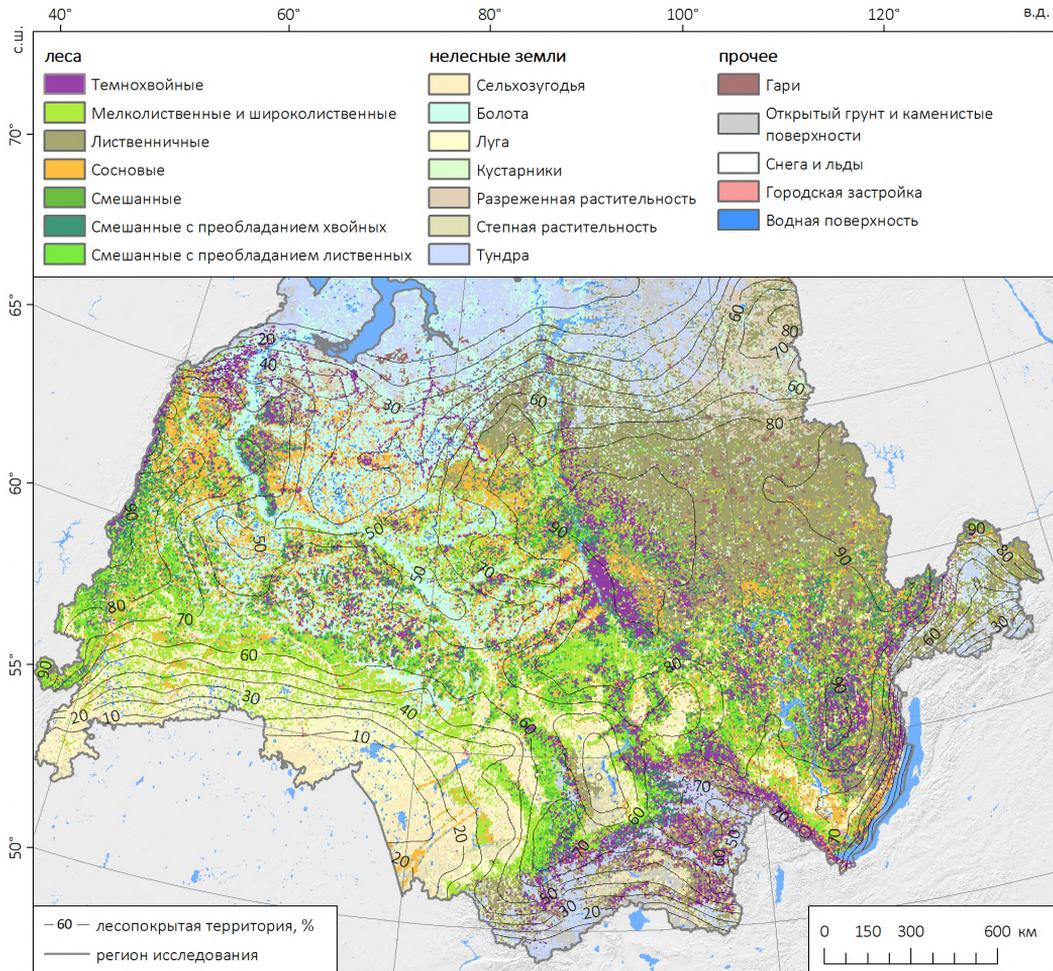
Северной Двины и Пинеги (Аксенов и др., 2003). Сосновые леса занимают наибольшие площади на северо-западе ЕТР (рис. 2.2).



**Рис. 2.2.** Типы растительного покрова и лесистость в лесной зоне ЕТР (на основе Карты растительности России (Барталев и др., 2016)). Показаны также границы Центрального Федерального округа и Пермского края, в пределах которых получены дополнительные данные о штормовых событиях.

К востоку от Урала, в сравнении с ЕТР, основными фактором нарушения лесного покрова являются не вырубки, а пожары (Krylov et al., 2014), поэтому

здесь широко распространены вторичные леса на гарях разного возраста. Крупные массивы первичных темнохвойных лесов представлены в горах Южной Сибири, а также на Енисейском кряже (рис. 2.3). Восточнее Енисейского кряжа преобладающей лесообразующей породой является лиственница сибирская. В этой области, как показано далее, частота возникновения ветровалов минимальна.



**Рис. 2.3.** Типы растительного покрова и лесистость в лесной зоне Сибири (на основе Карты растительности России (Барталев и др., 2016)).

### Исходные данные и структура базы данных

При создании базы данных о ветровалах использовались разнообразные источники информации, которые можно подразделить на две основные группы – спутниковые данные для выделения ветровалов и определения типа метеорологического явления, вызвавшего ветровал, и дополнительная информация для определения дат и некоторых других характеристик штормовых событий.

Идентификация и выделение ветровалов производилось по спутниковым данным Landsat и продуктам их обработки – Global Forest Change (далее по тексту – GFC) (Hansen et al., 2013) и Eastern'Europe Forest Cover Change (далее по тексту – EEFCC) (Potapov et al., 2015). За период 2016–2020 гг. также использовались данные со спутников Sentinel-2. Данные GFC доступны за период 2001–2020 гг., а данные EEFCC использовались для идентификации ветровалов за период 1986–2000 гг.

Данные GFC представляют собой результаты одноименного проекта, реализованного специалистами лаборатории GLAD (Global Land Analysis and Discovery) при университете штата Мэриленд совместно с компанией Google. Данные были впервые опубликованы в 2013 г., и в дальнейшем ежегодно актуализируются. Для идентификации ветровалов использовался основной продукт GFC – Forest Loss Year, представляющий собой данные о нарушениях (потерях) лесного покрова Земли с шагом в 1 год, полученные по многолетнему ряду снимков Landsat. Он предоставляется в виде целочисленного растра с размером ячейки 30 м в формате GeoTIFF. Важно отметить, что данные GFC информативны только для выделения сплошных, или ведущих к смене древостоя (stand-replacing) нарушений лесного покрова. Актуальная версия продукта доступна по ссылке (Global Forest Change, 2021). Общая точность данных GFC для выделения нарушений лесного покрова в бореальной зоне составляет 99,3%, а точность производителя и точность пользователя равны соответственно 93,9% и 88,0% (Hansen et al., 2013).

Продукт EEFCC, как и GFC, был создан специалистами лаборатории GLAD в рамках проекта по исследованию изменений лесного покрова Восточной Европы (Potapov et al., 2015). Данные о потерях лесного покрова представлены в виде целочисленного растра с размером ячейки 30 м, в котором выделены 4 класса – потери за 1986–1988, 1989–2000, 2001–2006 и 2007–2012 гг. Такие временные интервалы были выбраны разработчиками с целью минимизации влияния пропусков в исходных рядах спутниковых наблюдений. Точность данных

ЕЕФСС для выделения крупных нарушений лесного покрова оценивается в 88% (точность производителя) и 89% (точность пользователя), что сопоставимо с аналогичными характеристиками продукта GFC. Данные доступны по ссылке (Eastern'Europe ..., 2021).

Снимки со спутников серии Landsat (радиометров TM, ETM+ и OLI) уровня обработки Level1T использовались для подтверждения того, что выявленные нарушения лесного покрова вызваны именно ветровалами, а также для определения диапазона дат появления ветровалов и типа метеорологических явлений, вызвавших ветровалы, за весь исследуемый период (1986–2020 гг.). Также многие ветровалы были либо оцифрованы по снимкам Landsat вручную, либо выделены в полуавтоматическом режиме (в тех случаях, когда выделение по данным GFC, ЕЕФСС было невозможным). Спутниковые данные Sentinel-2 (радиометра MSI) использовались для решения аналогичных задач за период 2016–2020 гг. Также они являются основным источником информации для оперативной актуализации базы данных о ветровалах. Данные Landsat и Sentinel-2 были получены из открытых каталогов (USGS EarthExplorer, 2021; EOS LandViewer, 2021).

Снимки высокого пространственного разрешения (2 м и детальнее) с открытых картографических сервисов использовались для отделения ветровалов, вызванных смерчами, от прочих ветровалов, на основе анализа характера повреждения древостоя. Для визуального анализа снимков использовалась программа Google Earth Pro, а также другие открытые картографические сервисы (Bing Maps, ESRI Imagery и Here). Доступность архивных снимков высокого разрешения существенно различается для разных районов ЕТР. Так, если для густонаселенных районов доступно по 3–6 изображений в год, то на некоторые малонаселенные районы снимки отсутствуют вовсе. Распределение данных во времени также неравномерно – первые снимки доступны за 2001–2003 гг., но частота обновления снимков существенно возросла после 2015 г.

Архивы срочных 3-х часовых наблюдений сети метеостанций, которые использовались для определения дат штормовых событий, вызвавших ветровалы и для оценки их характеристик (скорости порывов ветра, количества осадков и др.). Всего были получены данные с 402 метеостанций Росгидромета и АМСГ аэропортов. Данные за период с 1986 по 2005 гг. получены из массива ВНИИГМИ-МЦД только по реперным метеостанциям (Булыгина и др., 2014). За последующие годы использовались оперативные данные всей сети метеостанций, публикуемые на открытых сервисах (Погода и климат, 2021).

Помимо данных метеостанций для определения дат и оценки характеристик штормовых событий использовались ежемесячные обзоры из журнала «Метеорология и гидрология» (Научно-технический журнал..., 2001–2021), база данных (Шамин и др., 2019), и база данных ESWD (European Severe Weather Database, 2021). Данные о ветровалах, полученные в рамках исследований, также использовались для пополнения базы данных ESWD. Для получения дополнительной информации о штормовых событиях, вызвавших ветровалы, анализировались сообщения в СМИ и социальных сетях, фотографии и видеозаписи, в ряде случаев производился опрос очевидцев явлений. Верификация этих сообщений производилась на основе спутниковых и радиолокационных наблюдений, а при их отсутствии – по данным ближайших метеостанций.

Снимки с геостационарных метеорологических спутников (в основном Meteosat/SEVIRI, для Центральной Сибири – HIMAWARI-8/AHI) а также с полярно-орбитальных спутников Terra/Aqua (сенсора MODIS) использовались, прежде всего, для оценки характеристик мезомасштабных конвективных систем (МКС, конвективных штормов), с которыми были связаны ветровалы. Данные Meteosat использовались за период с 2006 г., Terra/Aqua – с 2001 г., HIMAWARI-8 – для отдельных событий 2020 г. С их помощью удалось установить дату и время возникновения (с точностью от 15 мин до 2 ч) более 300 ветровалов (подробнее см. главу 4). Помимо спутниковых снимков, для определения времени возникновения нескольких ветровалов использовалась оперативная информация сети доплеровских метеорологических радиолокаторов (ДМРЛ) (Дядюченко и др., 2014).

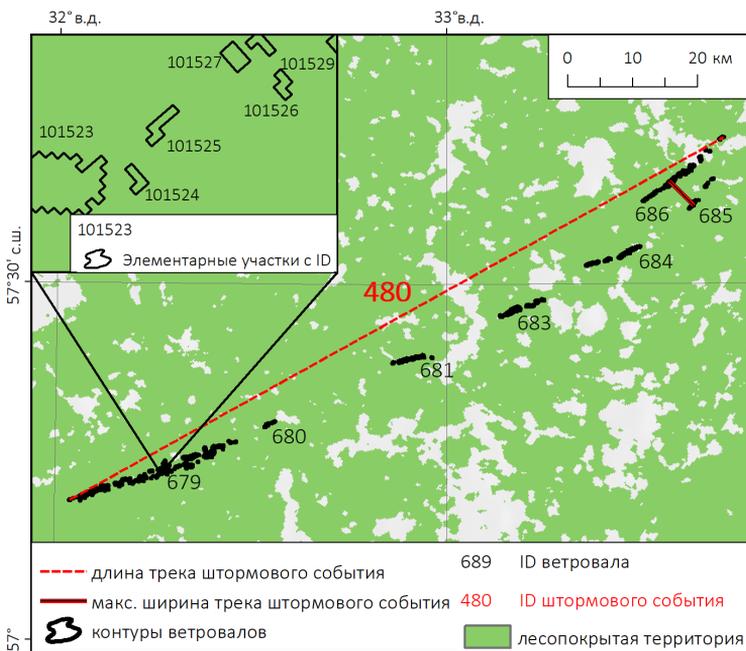
### **Структура базы данных о ветровалах**

Созданные базы данных включают три класса пространственных объектов, которые соответствуют трем иерархическим уровням представления информации о ветровалах:

- Элементарный поврежденный участок – отдельный участок леса, поврежденный ветром, представленный в виде простого полигона. Минимальная площадь такого участка составляет 0,18 га, что соответствует двум пикселям Landsat.
- Ветровал – группа близко расположенных элементарных участков, связанных с одним штормовым событием (шквалом, смерчем, сильным ветром или гололедом/снегопадом). Представлен в виде сложного (составного) полигона.

- Трек штормового события – группа последовательно или параллельно расположенных ветровалов, имеющих одинаковое направление и возникших в одну дату (или диапазон дат), которые можно связать с прохождением одной МКС или неконвективного шторма. Представлен в виде сложного (составного) полигона.

Все данные имеют географическую систему координат WGS-1984 (EPSG:4326). Суммарная площадь объектов во всех классах одинакова, но группировка объектов и структура атрибутивных таблиц различаются. Для организации связи между объектами из разных классов в базе данных используются ключевые поля ID и storm\_ID. Структура атрибутивного описания элементарных участков, ветровалов и треков штормовых событий приведена в Приложении 1, а пример структуры базы данных для конкретного штормового события – на рис. 2.4. Основным в базе данных является класс объектов ветровалов, для которого приведено наиболее полное атрибутивное описание, включающее сведения об использованных источниках информации.



**Рис. 2.4.** Пример трехуровневой иерархической структуры базы данных на примере ветровала, произошедшего 02.08.2017 г. Также показано параллельное (680, 681) и последовательное (684, 689, 682, 678) расположение ветровалов

Для отнесения элементарных участков к одному ветровалу или наоборот, для их разделения, были приняты пороговые критерии. Расстояние между ближайшими элементарными участками в пределах одного ветровала обычно не превышает десятки или сотни метров. В некоторых случаях оно может быть значительно больше – например, если ветровал пересекает открытые участки местности, или степень повреждения древостоя незначительна. Учитывая это, пороговое значение расстояния между двумя элементарными участками, относящимися к одному ветровалу, было принято равным 10 км. Данный порог приблизительно соответствует критерию пяти миль, используемому для разделения последовательных случаев смерчей в США (Doswell, Burgess, 1988). В некоторых случаях разделение на два ветровала происходило при существенно меньшем расстоянии (до 1 км) – например, если смерчевый ветровал трансформировался в шкваловый, или отмечалось резкое снижение доли поврежденных насаждений вдоль линии ветровала, указывающее на значительное снижение скорости ветра.

Отнесение ветровалов к одному штормовому событию реализовано на основе анализа взаимного расположения ветровалов и дополнительных источников информации (снимков с метеорологических спутников, данных метеостанций, сообщений о нанесенном ущербе). К одному событию может быть отнесено от одного до 15–20 ветровалов. Для отнесения последовательно расположенных ветровалов к одному штормовому событию порог расстояния не использовался (максимальное расстояние составляет 150 км для случая 08.07.2007 г. в Татарстане). Также с одним штормовым событием могут быть связаны параллельно расположенные ветровалы (рис. 2.4). Последовательное расположение указывает на связь ветровалов с одной конвективной ячейкой, которая генерировала серию смерчей или нисходящих порывов, а параллельное – с двумя или более различными ячейками или мезоциклонами, включенными в одну линейную конвективную систему. Анализ данных со спутников Meteosat (Chernokulsky et al., 2023) подтверждает эти гипотезы.

### **2.3. Создание картографических баз данных о ветровалах**

Процесс идентификации ветровалов и оценки их характеристик включал 4 основных этапа (рис. 2.5):

- поиск и выделение контуров ветровалов на основе данных GFC, EEFCC и спутниковых снимков Landsat и Sentinel-2;

- последующая верификация выделенных контуров по спутниковым снимкам с определением типа метеорологического явления, вызвавшего ветровал;
- оценка геометрических характеристик ветровала;
- определение даты (диапазона дат), времени и других характеристик метеорологического явления, вызвавшего ветровал.

Процесс сбора данных в основном был реализован с применением стандартных инструментов ГИС. Отдельные этапы, а именно, извлечение контуров ветровалов из данных GFC, EEFCC и расчет геометрических характеристик были автоматизированы с применением языка программирования Python. Более полная автоматизация процесса сбора данных затруднена в связи с использованием разнородной исходной информации и экспертных оценок на различных этапах работы. Полученные данные имеют пространственные и временные неоднородности и иные ограничения (см. п.2.4).

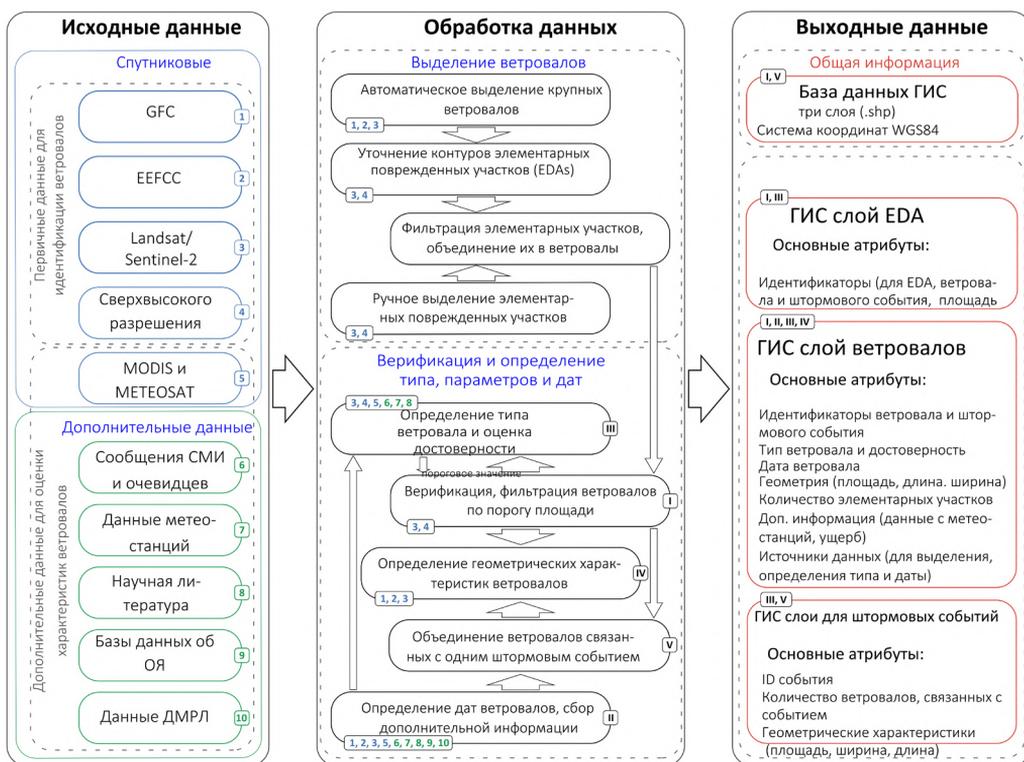


Рис. 2.5 Общая схема процесса сбора данных

### Идентификация ветровалов по спутниковым данным и продуктам их обработки

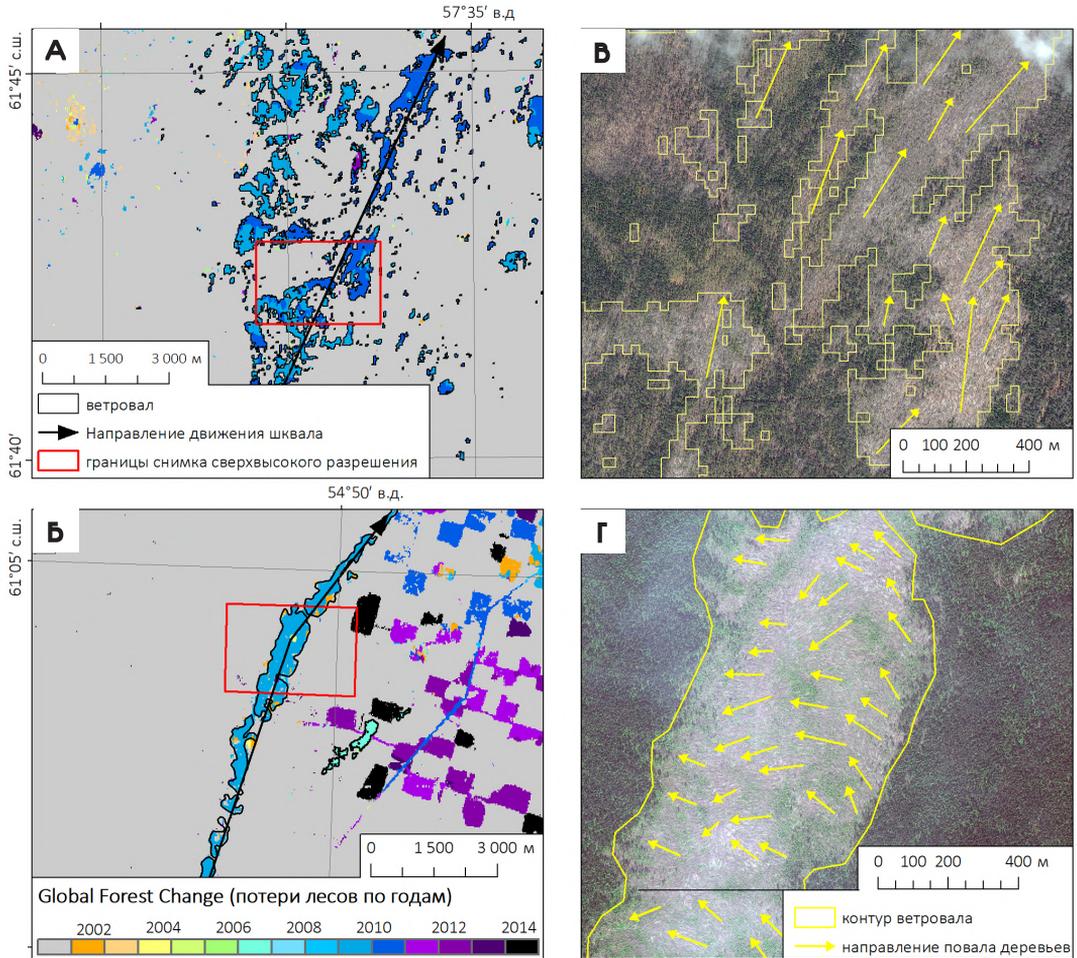
Первичный поиск ветровалов производился по данным GFC (за период 2001–2020 гг.) и EEFCC (за период 1986–2000 гг.), с использованием снимков Landsat для экспресс-верификации. Поиск нарушений лесного покрова, имеющих сходные с ветровалами геометрические характеристики, производился в каждой ячейке сетки размером 50×50 км, покрывающей всю исследуемую территорию.

Ветровалы на спутниковых снимках среднего пространственного разрешения имеют спектральные характеристики, сходные с другими нарушениями лесного покрова (Крылов, Владимирова, 2011), но существенно отличаются по геометрическим особенностям и по текстуре изображения. Важнейшим отличительным признаком подавляющего большинства ветровалов является протяженность вдоль направления ветра. Ветровалы крайне редко имеют эллиптическую или прямоугольную форму, которая более характерна соответственно для гарей и вырубок (Shikhov, Chernokulsky, 2018, Shikhov et al., 2019). При этом ветровалы, вызванные шквалами, неконвективными сильными ветрами или гололедными явлениями имеют сложную пространственную структуру с сочетанием различной степени повреждения лесного покрова, тогда как ветровалы, вызванные смерчами, имеют в общем случае квазилинейную форму с преобладанием сплошного повреждения древостоя (Shikhov, Chernokulsky, 2018). Все эти признаки позволяют обнаружить ветровалы на фоне других нарушений лесного покрова не только по спутниковым снимкам, но и по данным GFC/EEFCC (рис. 2.6).

После обнаружения по данным GFC/EEFCC нарушений лесного покрова, имеющих сходные с ветровалами геометрические признаки, производилось их извлечение с помощью инструмента, разработанного на языке Python. Данный инструмент реализует функции выбора ячеек раstra Forest Loss Year, соответствующих нарушениям лесного покрова в пределах заданной пользователем области, растрово-векторное преобразование и заполнение некоторых полей атрибутивной таблицы. В результате формируются составные полигоны (состоящие из множества элементарных участков ветровала), для которых производилась верификация и редактирование контуров.

В частности, были удалены все элементарные участки площадью менее 0,18 га. Необходимость их фильтрации обусловлена тем, что для таких локальных повреждений невозможно доказать, действительно ли они являются

ветровалами. Кроме того, в работе (Королева, Ершов, 2012) было установлено существенное завышение площади для таких локальных участков ветровала по данным Landsat. В среднем для участков ветровала площадью около 0,09 га (1 пиксел Landsat), площадь завышается в 2,7 раза.

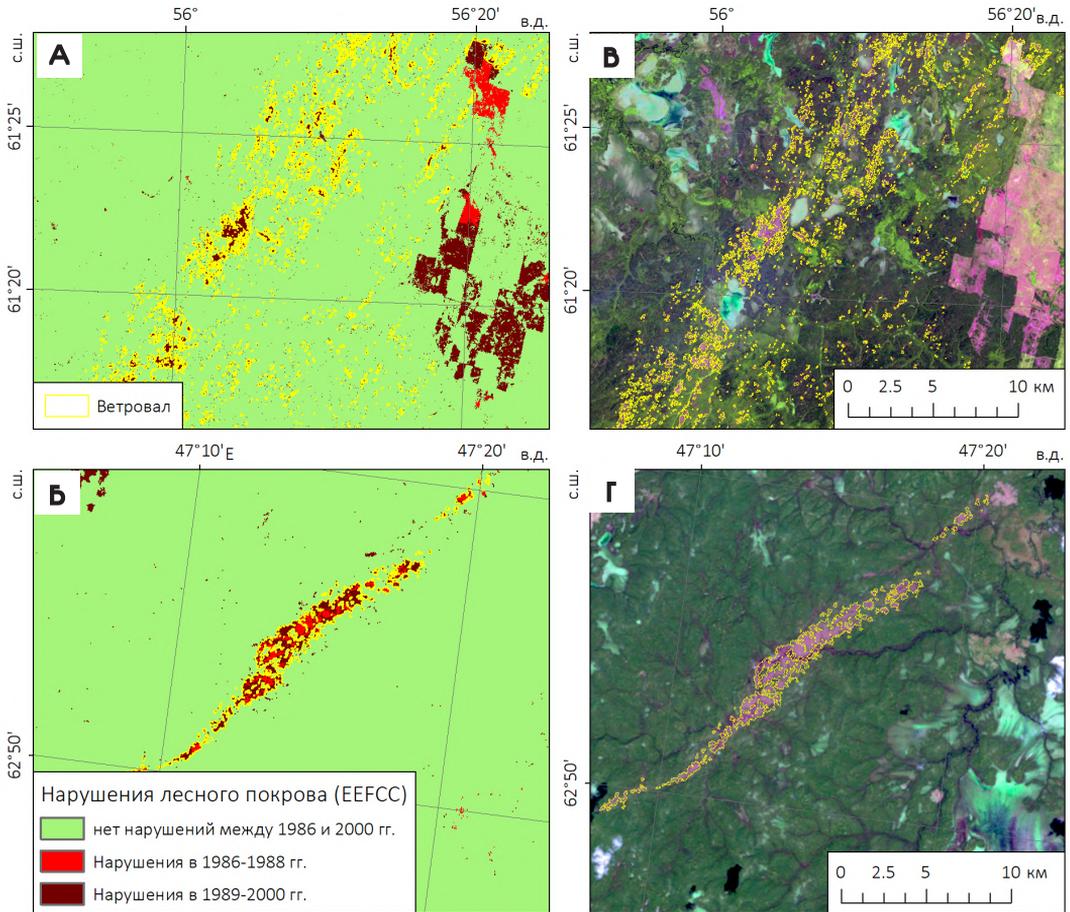


**Рис. 2.6.** Идентификация ветровала, вызванного шквалом (а, б) и смерчем (в, г) по данным GFC, и их отличительные признаки (на примере события 07.06,2009 г.).

Фильтрация участков с площадью менее 0,18 га приводит к уменьшению выделенной площади ветровалов в среднем на 2–3% (в некоторых случаях до 6–10%). Однако такое занижение является приемлемым, учитывая то, что фильтрация позволяет исключить множество участков повреждения древостоя, которые не являются ветровалами, а связаны с локальным усыханием древостоя в виде куртин (их площадь, как правило, находится в пределах 1–2 пикселей Landsat). Всего по данным GFC было выделено 536 ветровалов на ЕТР и 547 ветровалов в Сибири, контуры 237 из них были существенно уточнены по снимкам Landsat, Sentinel-2 или высокого пространственного разрешения.

Идентификация ветровалов по данным EEFCC в целом проводится по аналогичной схеме, но с некоторыми модификациями. Основное ограничение данных EEFCC в сравнении с данными GFC состоит в том, что нарушения лесного покрова в них классифицированы всего на 4 периода (1986–1988, 1989–2000, 2001–2006 и 2007–2012 гг.). В результате ветровалы часто перекрываются с вырубками и горями. Наибольшие сложности вызывает идентификация ветровалов после проведения санитарных рубок, что более характерно для южной, более населенной части исследуемой территории. Непосредственно по данным EEFCC удалось выделить только те ветровалы, которые не перекрываются с другими нарушениями лесного покрова и на которых не проводились последующие санитарные рубки (рис. 2.7). Контуры остальных ветровалов были оцифрованы вручную по снимкам Landsat (для небольших ветровалов), или выделены с применением полуавтоматической методики на основе разности вегетационных индексов (см. ниже).

Учитывая перекрытие ветровалов с вырубками и горями, характерное для данных EEFCC, при поиске ветровалов по этим данным дополнительно анализировались все участки, где одновременно произошла потеря лесного покрова на значительной площади, но при этом не имеющие характерных геометрических признаков ветровала. Таким образом, удалось выявить три крупных ветровала ( $S > 1000$  га каждый), перекрывающихся с вырубками. Однако существует вероятность, что некоторые ветровалы, в том числе крупные, были пропущены. Это является одним из основных источников временной неоднородности полученных данных о ветровалах. Всего по данным EEFCC было выделено 153 ветровала, контуры 49 из них были скорректированы по разновременным снимкам Landsat. Еще 36 ветровалов, произошедших в период 1986–2000 гг. были выделены по снимкам Landsat – вручную (30) или в полуавтоматическом режиме на основе разности вегетационных индексов (6).



**Рис. 2.7.** Выделение ветровала, вызванного шквалом 04.07.1992 г. (а, б) и смерчем 24.07.1988 г. (в, г) по данным EEFCC, с последующей верификацией по снимкам Landsat в комбинации каналов средний ИК – ближний ИК – красный

Выделение ветровалов по разновременным снимкам Landsat или Sentinel-2 на основе разности вегетационных индексов было реализовано в тех случаях, когда ветровал невозможно было выделить по данным GFC, EEFCC, а также он имел достаточно большую площадь или сложный контур. Всего на ЕТР и в Сибири таким способом было выделено 7 ветровалов по данным Landsat и 27 ветровалов – по данным Sentinel-2, на общей площади 35135 га. Разности

вегетационных индексов, вычисленные по снимкам Sentinel-2, использовались также при выделении ветровалов за 2021–2022 гг. не включенных в базу данных, в частности за 15.05.2021 г. (Чернокульский и др., 2022б). Аналогичная методика, но с использованием снимков Landsat-5, применена также для выделения ветровалов, связанных со вспышкой смерчей на ЕТР 9 июня 1984 г. (Chernokulsky, Shikhov, 2018).

В работе использована известная методика выделения ветровалов на основе разности коротковолнового вегетационного индекса NDII, впервые предложенного в работе (Hardisky et al., 1983). Данный индекс успешно применялся для идентификации ветровалов по снимкам Landsat в России (Крылов, Владимирова, 2011) и за рубежом (Wang et al., 2010; Wang, Xu, 2010). Индекс рассчитывается по следующей формуле:

$$\text{NDII} = (\text{NIR} - \text{SWIR1}) / (\text{NIR} + \text{SWIR1}), \quad (1)$$

где NIR и SWIR1 соответствуют коэффициентам спектральной яркости в ближнем ИК (0.76–0.90 мкм) и среднем ИК (1.55–1.75 мкм) диапазонах спектра. Значения NDII рассчитаны по безоблачным (с облачностью менее 10%) снимкам Landsat или Sentinel-2, полученным в ближайшие даты до и после нарушения лесного покрова. Далее рассчитывалась разность значений NDII, полученных до и после ветровала (рис. 2.8 в). Расчеты выполнялись только по снимкам, полученным в течение вегетационного периода. Атмосферная коррекция снимков не проводилась, поскольку ближний и средний ИК диапазоны спектра малочувствительны к атмосферным эффектам (дымке). Для минимизации ложных срабатываний, связанных с нелесопокрытыми территориями, производилось предварительное маскирование леса на снимках с применением одного из двух инструментов.

- Неуправляемая классификация летнего снимка, полученного до ветровала, с помощью алгоритма IZODATA – итеративная самоорганизующаяся методика анализа данных (Ball, Hall, 1965). В последующем производилось объединение выделенных кластеров, относящихся к лесопокрытой территории.
- Маскирование лесопокрытой территории по зимнему снимку, полученному в феврале или марте того же года, когда произошел ветровал. Для этого также использовался алгоритм IZODATA, или проводился прямой анализ яркости в красном канале с выделением порогового значения на основе гистограммы.

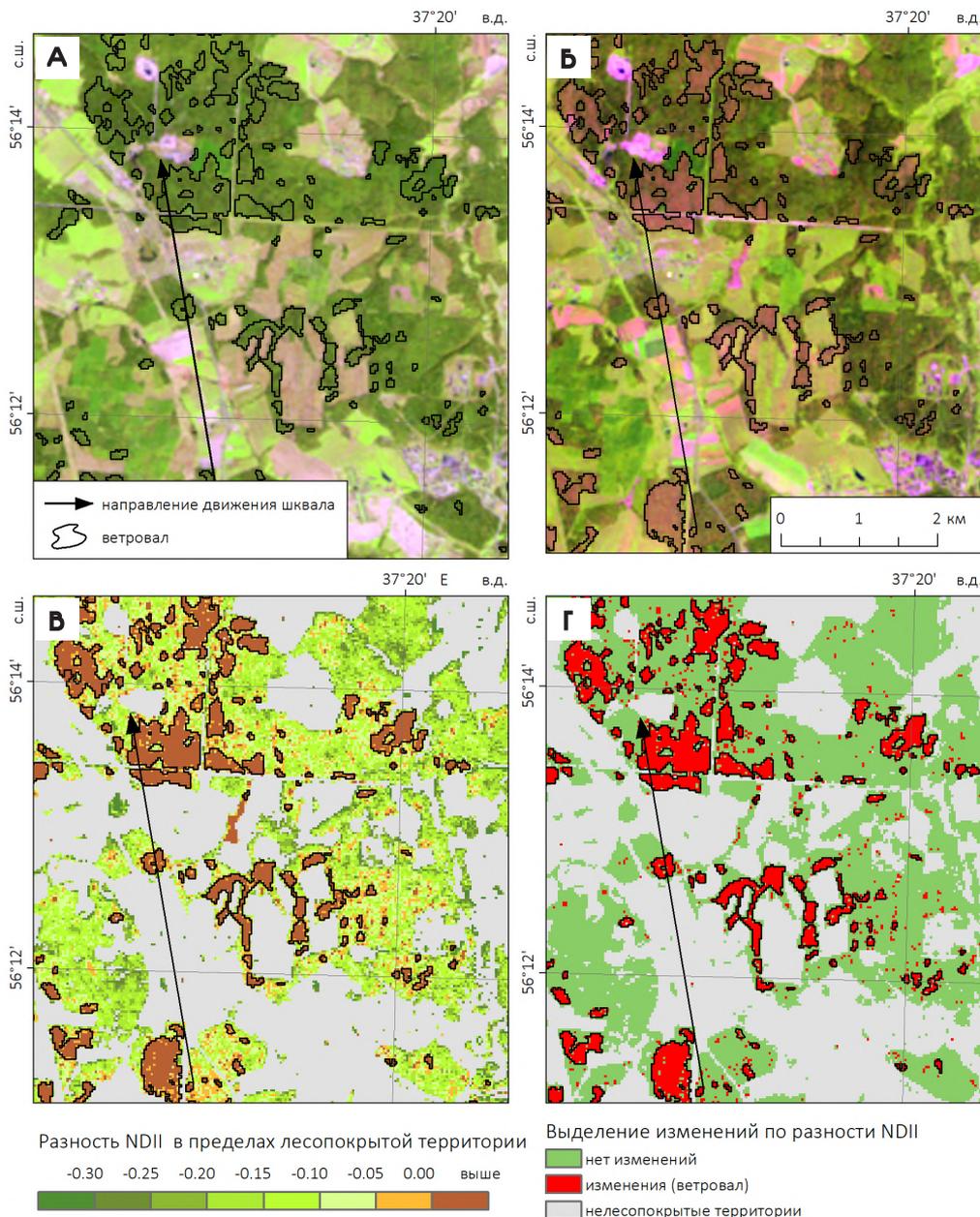
Далее рассматривались значения разности NDII (до и после ветровала) только в пределах маски лесопокрытой территории и производился подбор порогового значения для их отделения от неповрежденных или умеренно поврежденных насаждений. Ветровалы, как и другие нарушения, определяются как участки с резким снижением NDII. В работе (Королева, Ершов, 2012) было предложено рассчитывать пороговое значение на основе статистики раstra разности NDII. Однако данный критерий не является универсальным, поэтому производился подбор порога для каждой пары изображений, на основе сопоставления с визуально выделяемыми контурами ветровалов на разных участках изображения.

В результате были получены бинарные растры выделенных участков нарушений лесного покрова (рис. 2.8 г). Их дальнейшая обработка включала сглаживание (только для снимков Sentinel-2), конвертацию в векторный формат данных и дальнейшее редактирование с целью удаления ложно детектированных объектов и нарушений лесного покрова, не связанных с ветровалом. Как и для остальных ветровалов, были удалены элементарные поврежденные участки площадью менее 0,18 га.

Векторизация ветровалов вручную по снимкам Landsat, Sentinel-2 или по снимкам высокого разрешения выполнялась для небольших по площади (как правило, менее 200 га) ветровалов, которые по тем или иным причинам невозможно было выделить по данным GFC и EEFCC. Всего таким способом было выделено 262 ветровала – 102 по данным Landsat, 101 по снимкам Sentinel-2 и 59 по снимкам высокого разрешения.

### **Верификация контуров ветровалов и определение причины их возникновения**

Следующим этапом сбора данных была верификация выделенных нарушений лесного покрова, целью которой было подтвердить, что они действительно являются ветровалами, а также определить тип метеорологического явления, вызвавшего ветровал. Для верификации использовались спутниковые снимки Landsat, Sentinel-2, снимки высокого разрешения и дополнительная информация. Важнейшим фактором, определяющим достоверность определения типа метеорологического явления, вызвавшего ветровал, являются доступность снимков высокого разрешения (размер пиксела 2 м и детальнее), по которым можно оценить характер повреждения древостоя (Shikhov, Chernokulsky, 2018).



**Рис. 2.8.** Выделение ветровала, вызванного шквалом 21.06.1998 в Московской области на основе разности NDII по снимкам Landsat-5 TM: снимки, полученные до и после ветровала (а, б), разность NDII в пределах лесопокрытой территории (в) и участки со значительным изменением NDII (г)

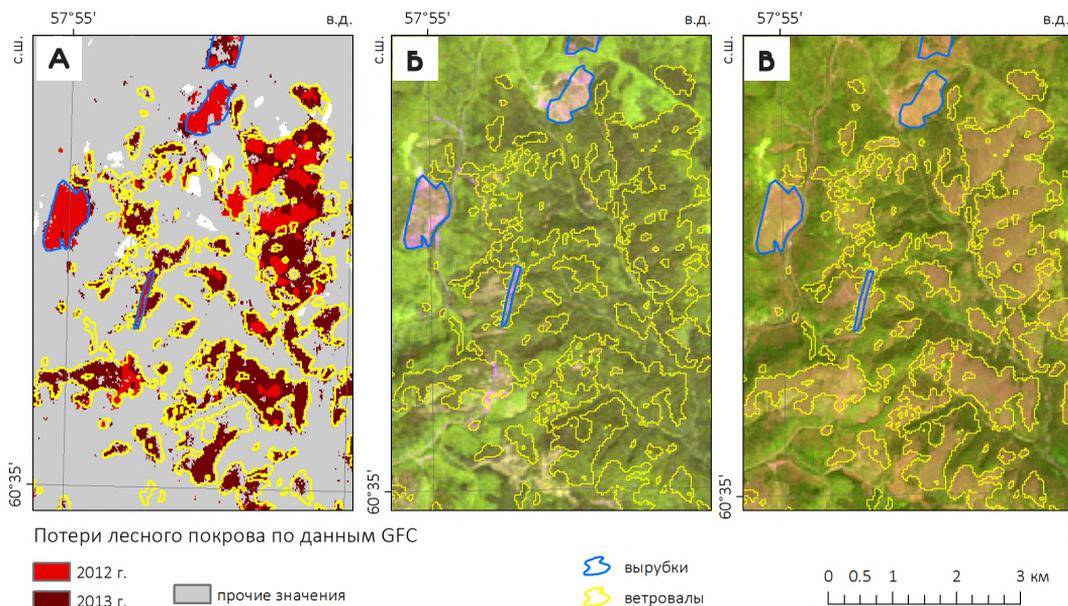
Такие снимки были доступны для 50% случаев ветровалов на ЕТР и 75,2% случаев ветровалов в Сибири. Такая разница обусловлена прежде всего тем, что для ЕТР учитываются также ветровалы за период до 2000 г., когда снимки высокого разрешения были недоступны. Также верификация проводилась по снимкам Landsat и Sentinel-2. Дополнительные данные, полученные с метеостанций (усиление ветра до 15 м/с и более, интенсивные осадки), из сообщений очевидцев и СМИ, из различных баз данных об опасных явлениях погоды и отчетов лесохозяйственных служб, использованы для верификации 37,8% ветровалов на ЕТР и 25,7% ветровалов в Сибири (различие обусловлено более высокой плотностью сети метеостанций и населения в лесной зоне ЕТР в сравнении с Сибирью). Проведенная сплошная верификация позволила свести к минимуму вероятность ошибочного включения в базу данных объектов, которые не являются ветровалами.

Проблемой, особенно значимой для крупных ветровалов, является их отделение от других нарушений лесного покрова, прежде всего от вырубок (рис. 2.9). Для этого использовались разновременные снимки Landsat или Sentinel-2 – последний безоблачный снимок, полученный до ветровала, и первый снимок, полученный после ветровала. Верификация и редактирование контуров производилось вручную на основе формы объектов и времени их появления. В результате были удалены вырубки, выделенные вместе с ветровалами, а также добавлены некоторые участки ветровалов, пропущенные в данных GFC, EEFCC, которые в основном приурочены к участкам лиственных лесов.

Определение типа метеорологического явления, вызвавшего ветровал, основано на анализе геометрических и текстурных характеристик спутниковых снимков, а также дополнительной информации. В базе данных выделены три основных типа ветровалов: вызванные смерчами, шквалами и явлениями неконвективной природы. К шквалам были отнесены также локальные микропорывы (Battles et al., 2017) и деречо – долгоживущие сильные шквалы, оставляющие полосы разрушений протяженностью свыше 400 км (Johns, Hirt, 1987). К неконвективным явлениям отнесены сильные ветра, в том числе сопровождающиеся интенсивными осадками, налипанием мокрого снега и гололедом, вызванные прохождением глубоких циклонов умеренных широт.

В первую очередь выполнено отделение ветровалов, вызванных смерчами, от прочих ветровалов, на основе геометрических особенностей и характера повреждения древостоя. Основным признаком ветровалов, вызванных

смерчами, является хорошо выраженный (на  $45^\circ$  и более) поворот направления повала деревьев влево относительно направления движения, что указывает на циклоническое вращение в воронке смерча (рис. 2.6, 2.10). Эта особенность легко определяется по снимкам высокого разрешения (Beck, Dotzek, 2010; Shikhoi, Chernokulsky, 2018). Очень редко встречаются смерчи с антициклоническим вращением (Chernokulsky et al., 2020a), но на изучаемой территории они не выявлены.

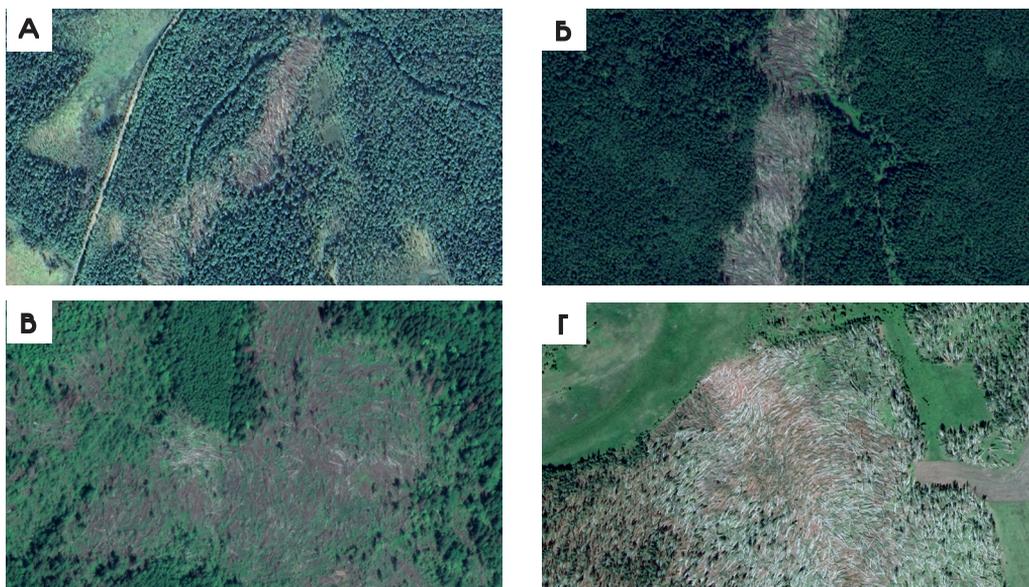


**Рис. 2.9.** Отделение участков ветровала от вырубок, на примере события 18.07.2012 г. в Пермском крае: участки потерь лесного покрова, выделенные по данным GFC (а), и снимки Landsat, полученные до и после штормового события (б, в).

Также характер повреждения древостоя может быть информативен для оценки интенсивности смерча (Godfrey, Peterson, 2017). Однако в пределах изучаемой территории преобладают древесные породы с низкой прочностью древесины. В лесах, состоящих из таких древесных пород, обширные участки сплошного ветровала наблюдаются при смерчах интенсивностью F2 и выше (Wind Science..., 2006), а более высокую интенсивность по спутниковым снимкам определить проблематично, для этого необходимы полевые обследования. Признаком смерча с интенсивностью F3 или выше может быть,

например, хорошо различимое нарушение почвенного покрова в центральной части участка ветровала (рис. 2.10 г), что наблюдалось в случае 18.06.2017 г. в Курганской области, где интенсивность смерча достигала F4 (Chernokulsky et al., 2020b).

При отсутствии снимков высокого разрешения, рассматривались дополнительные признаки смерчевых ветровалов, такие как квазилинейная структура с соотношением протяженности и ширины 10:1 и более (1), наличие плавных поворотов трека (2) и преобладание сплошного характера повреждения древостоя (3) (Shikhov, Chernokulsky, 2018). Аналогичное соотношение протяженности и ширины полосы разрушений характерно и для смерчей в США (Schaefer, Edwards, 1999).



**Рис. 2.10.** Характерные признаки ветровалов, вызванных смерчами различной интенсивности, на спутниковых снимках сверхвысокого разрешения с сервиса Google Earth: а) – F1, б) – F1/ F2; в) – F2/F3 г) – F3/F4

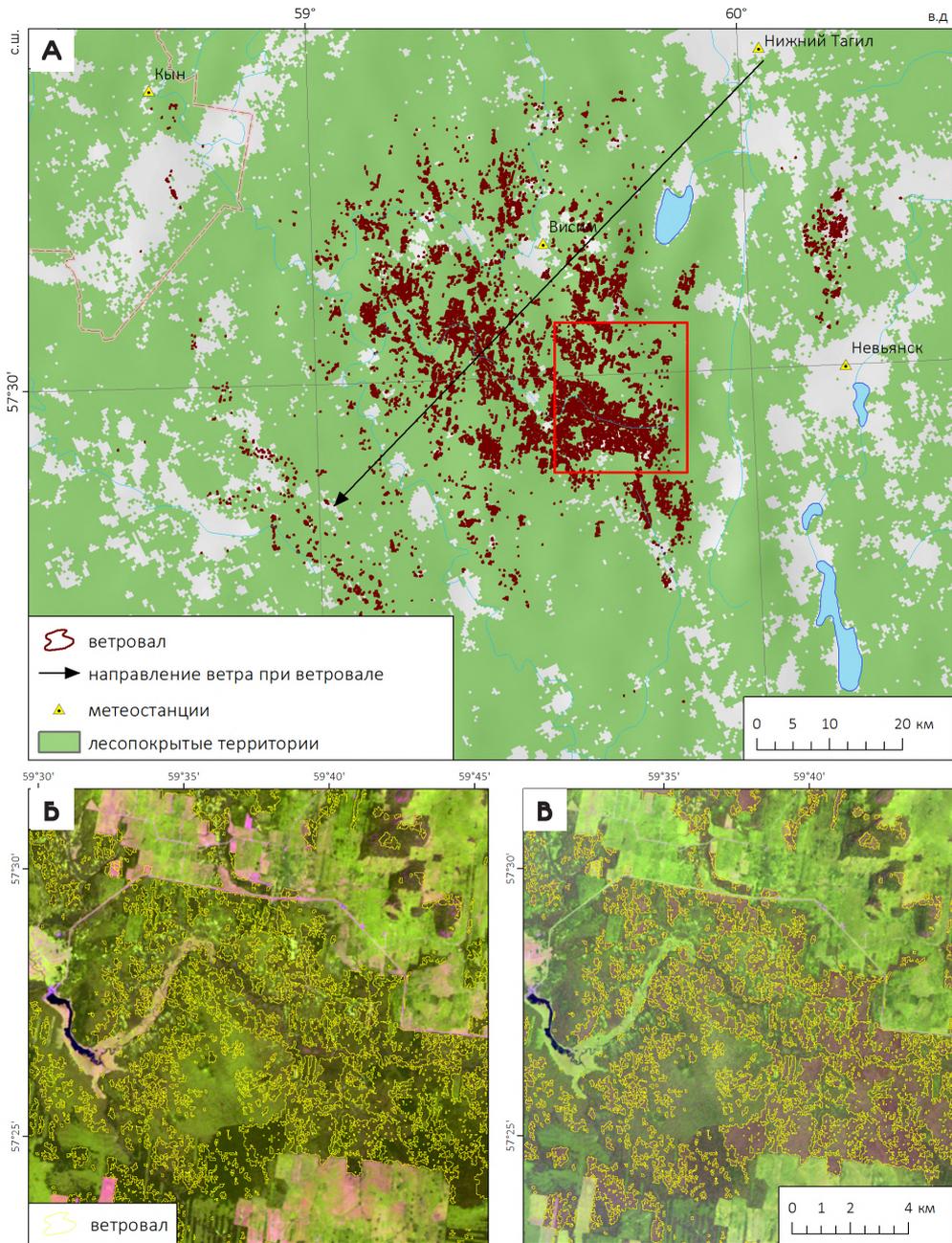
В свою очередь, ветровалы, вызванные неконвективными явлениями, также имеют характерные дешифровочные признаки на спутниковых снимках. Они могут иметь большую протяженность и ширину (до нескольких сотен км), но с преобладанием слабой или умеренной степени повреждения древостоев. При этом участки сплошного повреждения обычно совпадают с наиболее

подверженными ветровалам спелыми и перестойными темнохвойными лесами (Dobbertin et al., 2002; Schmoeckel, Kottmeier, 2008). Сильные ветры, связанные с прохождением глубоких циклонов умеренных широт, обычно охватывают обширные территории и хорошо фиксируются метеостанциями, что упрощает процесс атрибуции (привязки) ветровалов к этим событиям.

Ветровалы, вызванные сильными снегопадами и гололедными явлениями, могут быть успешно идентифицированы по периоду их появления и по особенностям пространственного положения. Большинство из них наблюдалось во второй половине осени, что не совпадает с сезоном развития конвективных явлений. Также большинство таких ветровалов отмечается в горной темнохвойной тайге Северного Урала, Кузнецкого Алатау, Западных и Восточных Саян. На равнинной территории подобные ветровалы чрезвычайно редки.

Однако сезонный критерий для поиска не является абсолютно достоверным. Наиболее крупные ветровалы в пределах изучаемого региона, вызванные неконвективными явлениями, отмечались в летний период. Так, масштабный ветровал, вызванный сочетанием сильного ветра (до 26 м/с) и налипания мокрого снега диаметром до 190 мм, произошел 06.06.1995 г. в районе Висимского заповедника на Среднем Урале (Алесенков и др., 2006). Другой случай катастрофического ветровала, вызванный сочетанием сильного ветра (до 28 м/с) и осадков (до 105 мм за сутки) в черноморском циклоне, наблюдался 07.08.1987 г. в Тверской, Новгородской и Псковской областях. В то же время не выявлено ни одного ветровала, произошедшего в зимний период. Еще одной особенностью ветровалов, связанных с налипанием мокрого снега, является отсутствие протяженности вдоль направления ветра, характерной для подавляющего большинства других ветровалов (рис. 2.11).

На основе перечисленных признаков ветровалов, вызванных различными метеорологическими явлениями, а также анализа дополнительной информации (данных метеостанций, баз данных об опасных явлениях погоды, сообщений в СМИ и социальных сетях, фотографий, видеозаписей), была оценена степень достоверности отнесения ветровала к тому или иному типу (табл. 2.1).



**Рис. 2.11.** Ветровал, вызванный сочетанием сильного ветра и отложения мокрого снега в районе Висимского заповедника 06.06.1995 г.: общий вид ветровала (а) и снимки Landsat-5 TM, полученные до (02.06.1995) и после (05.08.1995) события (б, в).

Таблица 2.1  
Признаки ветровалов,  
вызванных различными метеорологическими явлениями

Степень достоверности определения	Метеорологические явления, вызвавшие ветровал		
	Смерч	Конвективный шквал	Явление не конвективного характера
Высокая (более 90%)	Подтверждение смерча по независимому источнику (фото, видео), либо хорошо различимые на снимке высокого разрешения признаки вращения (поворот упавших деревьев влево на 45° и более), при отсутствии таковых – подтверждение по всем трем дополнительным признакам	Имеется независимое подтверждение, либо мозаичная или веерная пространственная структура с различной степенью повреждения древостоя; направление повала деревьев совпадает с направлением ветра	Имеется независимое подтверждение по данным метеостанций, очевидцев, сообщениям в СМИ и др.
Средняя (50 – 90%)	Линейный характер (соотношение длины и ширины 10:1 и более) и преобладание сплошного повреждения древостоя. Снимки высокого разрешения недоступны или не позволяют определить направление упавших деревьев.	Снимки высокого разрешения недоступны или не позволяют определить направление повала деревьев. Ветровал имеет линейную структуру, но соотношение длины и ширины < 10:1, нет преобладания сплошного характера повреждения и поворотов трека	По дате появления ветровала можно предположить низкую вероятность конвективных явлений (например, осенний сезон). Ветровал не имеет выраженной протяженности вдоль направления ветра

После определения типа метеорологического явления, вызвавшего ветровал, из базы данных были исключены ветровалы, вызванные смерчами и имеющие площадь < 5 га и прочие, имеющие площадь < 25 га. Необходимость определения пороговых значений минимальной площади обусловлена тем, что чем меньше площадь нарушения лесного покрова, тем сложнее доказать, что оно является ветровалом, особенно при отсутствии снимков высокого разрешения. Аналогичные сложности возникают при определении дат появления ветровалов небольшой площади. Наконец, для локальных ветровалов площадь по снимкам

Landsat и продуктам их обработки может быть систематически завышена (Королева, Ершов, 2012). В базу данных включено 6 ветровалов, вызванных шквалами и имеющих площадь ниже порогового значения, поскольку они имеют установленную дату и время возникновения и связаны с известными штормовыми событиями.

Выбор разных порогов минимальной площади для ветровалов, вызванных смерчами и другими явлениями, обусловлен тем, что смерчевые ветровалы обычно состоят из сравнительно небольшого числа участков со сплошным характером повреждения древостоя и лучше распознаются по спутниковым снимкам. В то же время ветровалы, вызванные другими явлениями, имеют более сложную пространственную структуру и включают множество локальных участков (куртин) сплошного повреждения древостоя. Так, среднее количество элементарных участков для ветровалов, вызванных смерчами и имеющих площадь от 25 до 100 га, составляет 15,5, а для ветровалов аналогичной площади, но вызванных другими типами явлений – 40,8.

### **Расчет геометрических характеристик ветровалов и оценка точности их определения**

Следующим этапом работы при формировании базы данных был расчет геометрических характеристик ветровалов. Для каждого ветровала была определена длина ( $L$ ), площадь ( $S$ ), а также средняя и максимальная ширина, рассчитанная с исключением разрывов ( $W_{\text{mean}}$  и  $W_{\text{max}}$ ) и без их исключения ( $W_{\text{tr,mean}}$  и  $W_{\text{tr,max}}$ ). Площадь ветровалов рассчитана в равноплощадной конической проекции Ламберта, а длина и ширина – в равнопромежуточной проекции, чтобы минимизировать соответствующие искажения.

Площадь ветровала представляет собой сумму площадей элементарных участков, отнесенных к одному ветровалу. В качестве  $L$  рассматривалась протяженность центральной линии, или расстояние между двумя наиболее удаленными вершинами полигонов, относящихся к одному ветровалу.  $W_{\text{mean}}$  рассчитывалась как среднее значение на основе множества трансект, перпендикулярных к центральной линии ветровала. Шаг между трансектами был принят равным 200 м, как оптимальное значение при выборе между точностью и продолжительностью вычислений (Shikhov, Chernokulsky, 2018).  $W_{\text{max}}$  рассчитывалась как наибольшее значение из длин трансект, пересекающих участки ветровала. При расчете  $W_{\text{mean}}$  и  $W_{\text{max}}$  учитывались только пересечения с участками ветровалов, разрывы исключались. На основе этих же трансект, но с включением разрывов между участками ветровалов были рассчитаны

$W_{tr\_mean}$  и  $W_{tr\_max}$ . Таким образом, для большинства ветровалов значения  $W_{tr\_mean}$  и  $W_{tr\_max}$  в несколько раз превышают  $W_{mean}$  и  $W_{max}$  соответственно. Аналогичным образом были рассчитаны геометрические характеристики элементарных участков (только  $S$ ) и треков штормовых событий ( $S$ ,  $L$ ,  $W_{tr\_mean}$  и  $W_{tr\_max}$ ). При расчете  $L$  для трека штормового события учитывалась не только длина ветровалов, но и расстояние между последовательно расположенными ветровалами. Если ветровалы были расположены параллельно, при расчете  $W_{tr\_mean}$  и  $W_{tr\_max}$  расстояние между ними не исключалось.

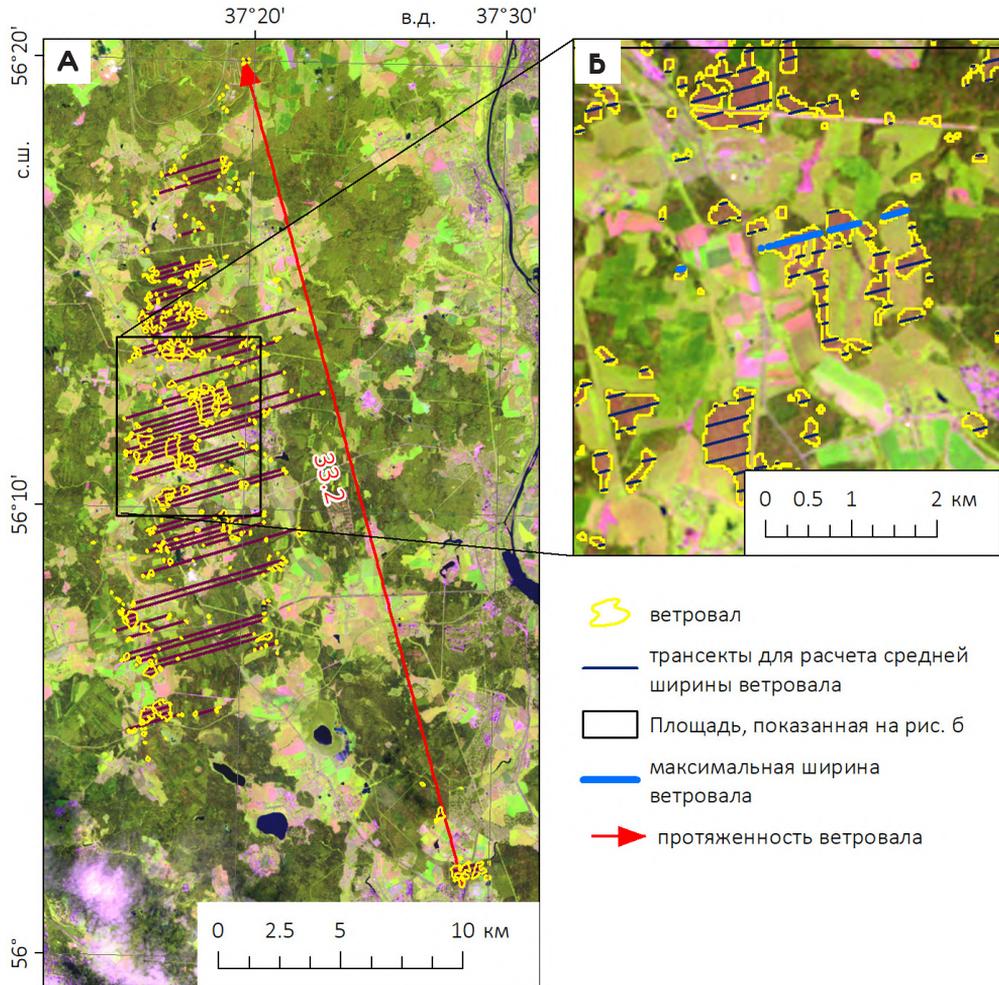
Построение центральной линии, трансект и расчет средней и максимальной ширины ветровалов автоматизирован с помощью инструмента на языке Python. Схема расчета приведена на рис. 2.12.

Точность расчета геометрических характеристик ветровалов и элементарных участков оценивалась на основе их сравнения с результатами ручной векторизации по снимкам сверхвысокого разрешения (размер пиксела 0,6 м), полученным с открытого сервиса ArcGIS Imagery. Аналогичный подход к оценке точности выделения ветровалов по снимкам Landsat использован в работе (Королева, Ершов, 2012).

Для оценки точности выделения ветровалов по данным GFC были созданы две выборки, включающие 25 ветровалов, вызванных смерчами и 10 ветровалов, вызванных шквалами. При формировании выборок учитывалась доступность снимков сверхвысокого разрешения на участки ветровалов, отсутствие перекрытия ветровалов с вырубками и горяями. В выборке смерчевых ветровалов площадь по данным GFC составляет от 5 до 1333 га, в выборке шкваловых ветровалов – от 26 до 609 га. Выбранные ветровалы были оцифрованы вручную по снимкам сверхвысокого разрешения. Значения геометрических характеристик, полученные по снимкам сверхвысокого разрешения, рассматривались как проверочный набор данных, по отношению к которому рассчитывались характеристики точности.

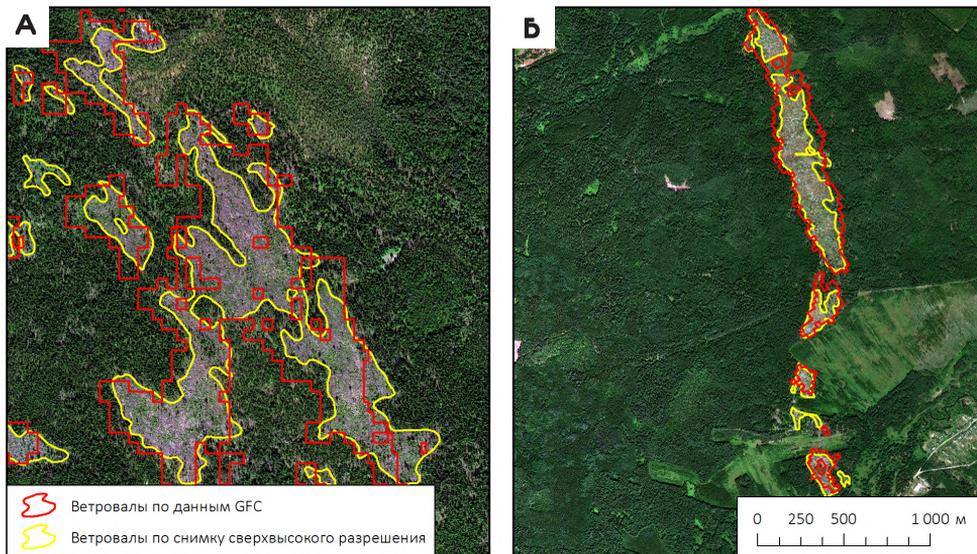
Оценка точности выделения элементарных участков была проведена только для шкваловых ветровалов. Выборка содержит 837 участков по данным GFC, которым соответствуют 959 участков по проверочному набору данных, причем суммарная площадь в двух наборах данных оказалась одинаковой (1709 га). Учитывая высокую точность геометрической коррекции данных Landsat и продукта GFC, систематическое смещение между ветровалами, выделенными по двум источникам данных, отсутствует. Однако из-за многократного различия в пространственном разрешении данных имеются многочисленные локальные расхождения (рис. 2.13). В частности, один участок ветровала по данным GFC

может соответствовать нескольким отдельным участкам в проверочном наборе, и наоборот. В результате, только 66,5% площади ветровалов по двум источникам данных совпадает. Локальные участки ветровала могут быть пропущены как по данным GFC, так и в проверочном наборе. Так, 146 участков выделены по данным GFC, но не выделены по проверочному набору, их общая площадь составляет 52,8 га. С другой стороны, 257 участков на общей площади 103,5 га имеются в проверочном наборе, но не выделены по данным GFC.



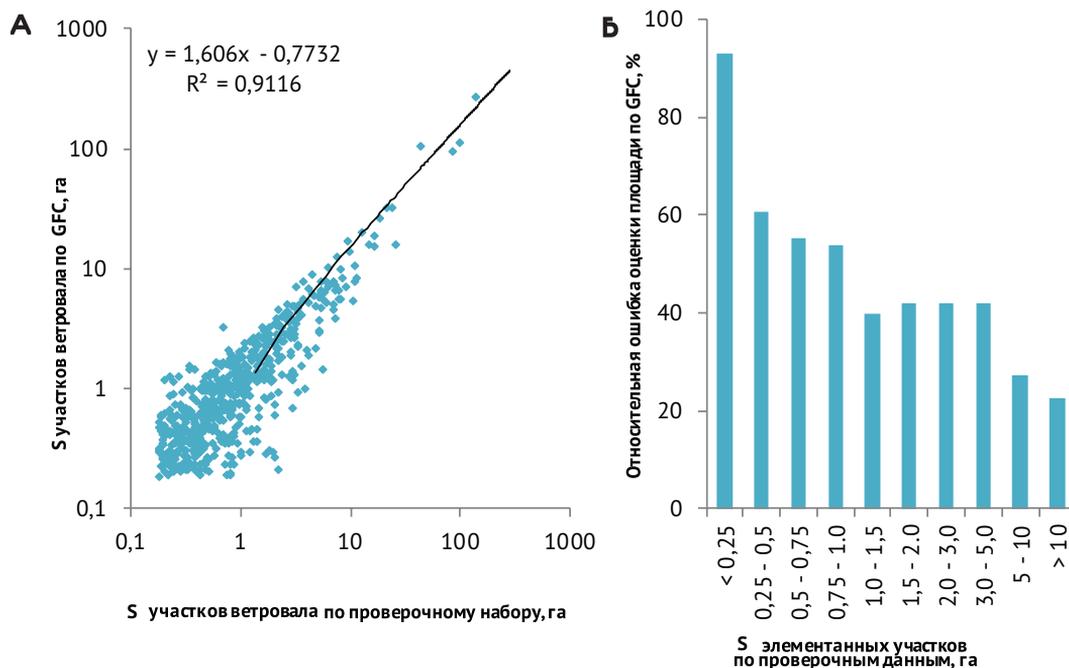
**Рис. 2.12.** Схема расчета геометрических характеристик ветровала, выделенного по снимку Landsat (на примере ветровала в Московской области 21.06.1998).

Оценка точности выделения элементарных участков была проведена только для шкваловых ветровалов. Выборка содержит 837 участков по данным GFC, которым соответствуют 959 участков по проверочному набору данных, причем суммарная площадь в двух наборах данных оказалась одинаковой (1709 га). Учитывая высокую точность геометрической коррекции данных Landsat и продукта GFC, систематическое смещение между ветровалами, выделенными по двум источникам данных, отсутствует. Однако из-за многократного различия в пространственном разрешении данных имеются многочисленные локальные расхождения (рис. 2.13). В частности, один участок ветровала по данным GFC может соответствовать нескольким отдельным участкам в проверочном наборе, и наоборот. В результате, только 66,5% площади ветровалов по двум источникам данных совпадает. Локальные участки ветровала могут быть пропущены как по данным GFC, так и в проверочном наборе. Так, 146 участков выделены по данным GFC, но не выделены по проверочному набору, их общая площадь составляет 52,8 га. С другой стороны, 257 участков на общей площади 103,5 га имеются в проверочном наборе, но не выделены по данным GFC.



**Рис. 2.13.** Соотношение контуров ветровалов, выделенных по данным GFC и оцифрованных вручную по снимкам сверхвысокого разрешения на примере ветровала, вызванного шквалом (а) и смерчем (б).

Дальнейшие расчеты выполнены только для перекрывающихся участков (всего 592 объекта с общей площадью 1680 га по данным GFC и 1615 га по проверочному набору). Между площадями ветровалов по двум источникам данных существует тесная линейная зависимость с коэффициентом детерминации  $R^2 = 0,911$  (рис. 2.14 а). Средняя абсолютная ошибка (MAE) и среднеквадратичная ошибка (RMSE) выделения участков ветровалов по данным GFC составляют 0,7 и 2,0 га соответственно при средней площади ветровала, равной 2,7 га. Это указывает на значительные неточности, обусловленные разным пространственным разрешением данных. По мере увеличения площади участков ветровала величина относительной ошибки снижается – от 93% для участков площадью менее 0,25 га до 22,7% для участков площадью более 10 га (рис. 2.14 б). Также относительная ошибка растет по мере усложнения формы участков ветровала (минимальные ошибки характерны для участков квазиокруглой формы). Полученные выводы близки к ранее опубликованным оценкам применимости снимков Landsat для выделения ветровалов (Королева, Ершов, 2012).



**Рис. 2.14.** Соотношение площадей участков ветровала по данным GFC и по проверочному набору (а) и зависимость средней относительной ошибки от размеров участка (б).

Таблица 2.2

Результаты сопоставления геометрических характеристик ветровалов, определенных по данным GFC и по снимкам сверхвысокого разрешения

№ п/п	Площадь (GFC /ПН*), га	Совпадающая площадь, га	Точность производителя	Точность пользователя	Длина, км (GFC/ ПН)	Средняя ширина, м (GFC/ ПН)	Макс. ширина, м (GFC/ ПН)
1	436.3/511.2	298.8	58.5	68.5	15.9/17.2	290/405	860/1798
2	608.7/649.2	504.1	77.6	82.8	9.4/9.4	588/612	1433/1467
3	174.8/154.9	75.5	48.7	43.2	42.5/42.5	104/87	542/390
4	155.2/131.9	79.6	60.3	51.3	9.0/9.1	178/152	681/593
5	133.4/92.8	71.5	77.0	53.6	6.7/6.8	220/145	638/510
6	100/76.2	41.1	53.9	41.1	21.8/21.8	86/70	343/250
7	88.2/76.2	41.1	53.9	46.6	14.6/14.7	112/97	458/382
8	42.9/32	19.1	59.7	44.5	7.4/7.2	85/53	233/179
9	27.6/14.9	11.5	77.2	41.7	2.1/2.1	136/79	306/264
10	26/25.4	15.6	61.4	60.0	9.4/9.4	86/59	188/206
Итого	1793/1765	1157.9	62.8	53.3	13.6/13.7	177/150	525/481

Примечание. \*ПН – проверочный набор.

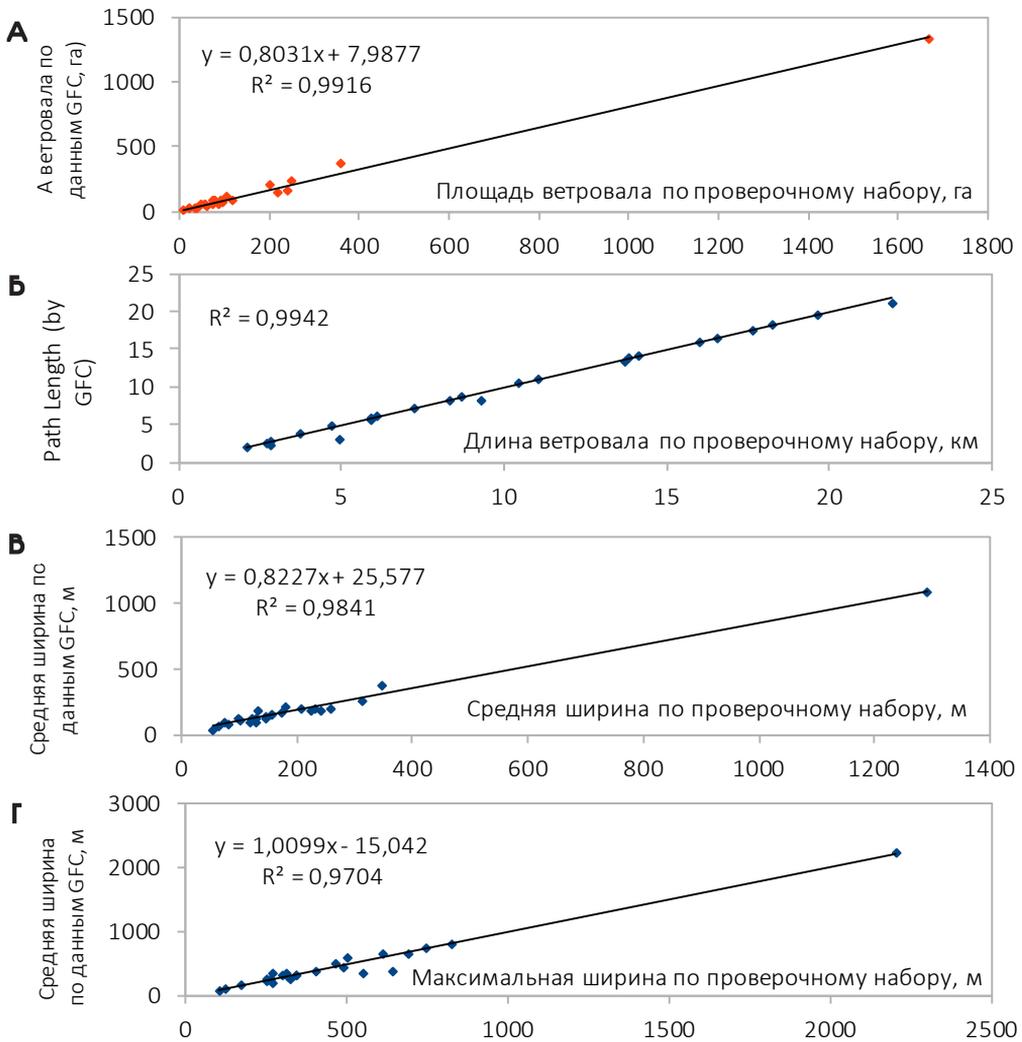
Точность выделения ветровалов в целом оценивалась по тому же проверочному набору. Для каждого из 10 ветровалов рассчитаны значения точности производителя и точности пользователя, а также оценена точность расчета других геометрических характеристик (длины, ширины). В основном точность выделения ветровалов по данным GFC определяется их площадью

и сложностью контура. Так, точность достигает 75% и выше для ветровалов, состоящих из небольшого числа участков и имеющих относительно простую форму. В то же время она снижается до 50% и ниже для ветровалов, состоящих из множества локальных участков (табл. 2.2).

Для 8 из 10 ветровалов обнаружено завышение площади по данным GFC в среднем на 14,6% (для одного из ветровалов – на 90%). В то же время для двух крупнейших ветровалов в выборке площадь по данным GFC занижена. Эта закономерность соответствует ранее опубликованным данным (Королева, Ершов, 2012). Расхождения по длине ветровалов по двум источникам данных минимальны, а расхождения  $W_{mean}$  и  $W_{max}$  соответствуют таковым по площади. Если по данным GFC площадь ветровала завышена, то завышены также  $W_{mean}$  и  $W_{max}$ , и наоборот (хотя для  $W_{max}$  есть и исключения из этой закономерности).

Аналогичные оценки точности, основанные на сравнении данных GFC и проверочного набора, были получены для выборки из 25 ветровалов, вызванных смерчами. Сопоставление геометрических характеристик смерчевых ветровалов ( $S$ ,  $L$ ,  $W_{mean}$  и  $W_{max}$ ) по данным GFC и по проверочному набору приведено на рис. 2.14. Как и для шкваловых ветровалов, наилучшее соответствие получено по длине ( $R^2 = 0,994$ ) и по площади ( $R^2 = 0,992$ ). При этом  $L$  несколько занижена для коротких ветровалов ( $L < 10$  км). Площадь занижена для 16 из 25 ветровалов, причем средняя относительная ошибка оценки площади составляет 17,9%, а для некоторых небольших ветровалов занижение достигает 30%. Занижение площади в первую очередь проявляется для узких ветровалов, или включающих множество локальных участков. Расхождения при расчете  $W_{mean}$  и  $W_{max}$  для некоторых ветровалов также достигают 30%. Однако встречается как завышение, так и занижение этих характеристик, в результате чего средняя ошибка оказалась близка к нулю.

Оценки точности геометрических характеристик смерчевых ветровалов приведены в табл. 2.3. В целом точность можно оценить как удовлетворительную. Однако выявленное занижение площади по данным GFC противоречит вышеописанным особенностям для ветровалов, вызванных шквалами. Это связано с небольшой шириной смерчевых ветровалов, что повышает вероятность пропуска отдельных участков, имеющих ширину сопоставимую с размером пиксела Landsat, по данным GFC.



**Рис. 2.15.** Сопоставление площади (а), длины (б), средней ширины (в) и максимальной ширины (г) ветровалов, вызванных смерчами, по данным GFC и по проверочному набору.

Таблица 2.3

Оценка точности определения геометрических характеристик ветровалов, вызванных смерчами, по данным GFC

Характеристика ветровала	Средняя ошибка МВЕ)	Средняя абсолютная ошибка (MAE)	Средне-квадратичная ошибка (RMSE)	Средняя относительная ошибка (MAPE), %
S	-0,97	28,71	71,25	17,9
L	-0,01	0,22	0,49	3,4
$W_{\text{mean}}$	-0,35	21,88	36,68	14,0
$W_{\text{max}}$	-0,42	43,60	71,51	10,5

Полученные значения  $S$ ,  $L$ ,  $W_{\text{mean}}$  и  $W_{\text{max}}$  для смерчевых ветровалов использовались как соответствующие характеристики смерчей при создании базы данных смерчей в Северной Евразии (Chernokuslky et al., 2020) и ее актуализации для территории России (Чернокульский и др., 2021). Вообще более 50% всех данных о геометрических характеристиках смерчевых треков в этих работах получены на основе анализа спутниковых снимков ветровалов.

Оценка точности расчета геометрических характеристик ветровалов по данным EEFCC представляет существенные сложности по причине недоступности снимков высокого разрешения или других проверочных данных для подавляющего большинства ветровалов за период до 2001 г. Исключением являются лишь отдельные ветровалы, которые произошли в первичных темнохвойных лесах и в последующие годы не были затронуты вырубками. Всего удалось выявить 5 таких ветровалов, 4 из которых вызваны смерчами. Для них были оцифрованы контуры по снимкам высокого разрешения, рассчитаны геометрические характеристики и оценки точности (табл. 2.4). Однако из-за малого объема выборки эти оценки могут быть нерепрезентативны для всех ветровалов, выделенных по данным EEFCC.

Таблица 2.4

Результаты сопоставления геометрических характеристик ветровалов, определенных по данным EEFCC и по снимкам высокого разрешения

№ п/п	Площадь (GFC / ПН*), га	Совпадающая площадь, га	Точность произво-дителя	Точность пользо-вателя	Длина, км (GFC/ ПН)	Средняя ширина, м (GFC/ ПН)	Макс. ширина, м (GFC/ ПН)
1	3.11/4.18	2.58	82.96	61.72	14.6/14.2	308/257	963/748
2	1.59/2.35	1.25	78.62	53.19	16.8/16.9	186/148	568/491
3	3.48/3.82	2.68	77.01	70.16	14.2/14.9	305/288	1507/1269
4	0.82/1.11	0.67	81.71	60.36	10.3/10.4	166/158	367/332
5	1.09/1.28	0.94	86.24	73.44	9.5/10.1	171/161	380/291

Примечание. \*ПН - проверочный набор

Для этих ветровалов выявлено существенное завышение  $S$ ,  $W_{\text{mean}}$  и  $W_{\text{max}}$  по данным EEFCC (более значительное, чем для данных GFC). Это завышение может быть объяснено тем, что по данным EEFCC выделяются не только участки, относящиеся к сплошному ветровалу, но и часть прилегающих частично поврежденных насаждений, которые в последующие годы погибли в результате размножения вредителей (напр. короёда-типографа). Высокая вероятность гибели (под воздействием вредителей) участков леса, прилегающих к ветровалу, обсуждается в российской и зарубежной литературе (Köster et al., 2009; Крылов, Владимирова, 2011).

#### **Оценка точности выделения ветровалов по данным GFC с учетом степени повреждения древостоя**

В продуктах GFC учитываются только сплошные (ведущие к смене породного состава) повреждения древостоя. Однако в связи с мозаичностью повреждения, в пределы выделенных по GFC участков попадает существенная площадь несплошного ветровала. Для оценки этой площади были рассмотрены два крупных ветровала, вызванных шквалом 18.07.2012 г. на северо-востоке

Пермского края и выделенные по данным GFC. Эти ветровалы были также оцифрованы по снимкам сверхвысокого разрешения с сервиса ArcGIS Imagery, с экспертным выделением двух степеней повреждения древостоя:

- сплошной ветровал (повалено или сломано свыше 90% деревьев);
- частичное повреждение (повалено или сломано 25–90% деревьев).

Соотношение характеристик ветровалов по двум источникам данных приведено в табл. 2.5. Совпадение площади для всех ветровалов составляет 55,7%, а для сплошных ветровалов – 76,2%. Такой процент совпадения соответствует приведенным в табл. 2.2 оценкам для ветровалов, вызванных шквалами. Важно отметить, что общая площадь ветровалов по данным GFC более чем вдвое превышает площадь сплошных ветровалов, оцифрованных по снимкам сверхвысокого разрешения. Это указывает на то, что по данным GFC выделяются не только сплошные ветровалы, но и многие участки с несплошной, но значительной степенью повреждения древостоя.

Таблица 2.5

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/(% от общей площади)	4969 (55,7%)	3194 (76,2%)	1765 (33,3%)
Не совпадающая площадь, га/(% от общей площади)	3948 (44,3%)	996 (23,7%)	3529 (66,6%)

### **Сопоставление площади выявленных ветровалов с данными государственного лесопатологического мониторинга**

Данные о площади ветровалов и других нарушений лесного покрова, полученные в результате государственного лесопатологического мониторинга (ГЛПМ) путем дешифрирования спутниковых снимков, аэрофотоснимков или наземных лесопатологических обследований, публикуются в разных источниках. В качестве открытых источников могут быть использованы сайты региональных подразделений ФБУ «Рослесозащита», сообщения в СМИ со ссылкой на эти организации, а также ежегодные Государственные доклады о состоянии и охране окружающей среды субъектов РФ. Эта информация использована как дополнительный источник для верификации данных о ветровалах, полученных по спутниковым снимкам.

Важно отметить, что в ходе ГЛПМ выявляются не только сплошные ветровалы, а все поврежденные ветром насаждения, требующие проведения лесозащитных мероприятий. Так, при визуальном лесопатологическом обследовании подлежат учету участки, где доля бурелома и ветровала вдвое превышает естественный отпад (отмершие деревья в результате естественного изреживания древостоя) (Приказ..., 2020). Из этого следует, что при полном учете поврежденных участков площадь ветровала по данным ГЛПМ должна значительно превышать площадь сплошных ветровалов, выявленных по спутниковым снимкам. В отдельных публикациях приведены сведения о площади не только всех поврежденных, но и погибших насаждений. На основе сопоставления опубликованных данных ГЛПМ по крупным ветровалам и их площади, оцененной по спутниковым снимкам, была составлена табл. 2.6.

Всего удалось получить оценки площади по данным ГЛПМ для 16 крупных ветровалов, произошедших в период 2007-2021 гг. в 11 субъектах РФ, в том числе для двух случаев известны площади погибших насаждений. В 10 из 16 случаев площадь ветровала по данным ГЛПМ существенно (в 1,5–3,7 раза) превышает площадь по спутниковым данным. Соотношение площадей по двум источникам данных зависит от характера повреждения древостоя, т.е. от отношения площади гибели насаждений к общей поврежденной площади. Как отмечено выше, это соотношение должно быть выше для смерчевых ветровалов, что в целом подтверждается полученными данными (за исключением случая 02.08.2017 в Новгородской области). Площади погибших насаждений по данным ГЛПМ для обоих ветровалов, по которым имеются данные, отличаются от спутниковой оценки менее чем на 10%. В одном случае площадь ветровала по спутниковым данным оказалась существенно (на 30%) выше, чем по данным

ГЛПМ. Вероятно здесь и в ряде других случаев, когда соотношение площадей близко к единице, по данным ГЛПМ также учитывались только погибшие насаждения.

Таблица 2.6

Сопоставление площади некоторых крупных ветровалов по спутниковым снимкам с данными ГЛПМ. Выделены данные ГЛПМ о площади погибших насаждений

Дата ветровала	Тип явления	Субъект РФ, район	Площадь, га		Ссылка на данные ГЛПМ
			По спутниковым данным	По данным ГЛПМ	
01.06.2007	шквал	Респ. Башкортостан	2248	7900	(Васильев и др., 2007)
Июнь 2009 г.	шквалы, смерчи	Ярославская обл.	645.5	636.3	(Доклад..., 2011)
12.06.2010	шквалы, смерчи	Костромская обл., Островский и Судиславский районы	3420	4046	(Департамент лесного хозяйства..., 2011)
27.06.2010	шквал	Вологодская обл., Грязовецкий район	11258	42000	(Доклад..., 2012)
27.06.2010	шквал	Вологодская обл. (в целом)	33794	75000/ 36785	(Доклад..., 2012)
27.06.2010, 12.06.2010, 18.08.2010	шквалы	Ярославская обл.	15512	38000	(Доклад..., 2011)
29.07.2010	шквал	Ленинградская обл.	28975	33000	(Чабак, 2011)
29.07.2010	шквал	Новгородская обл.	34013	57700	(Доклад Губернатора..., 2021)
23-24. 05.2013	шквалы, смерчи	Смоленская обл.	443.4	673	(Доклад..., 2014)

Дата ветровала	Тип явления	Субъект РФ, район	Площадь, га		Ссылка на данные ГЛПМ
			По спутниковым данным	По данным ГЛПМ	
2016 г.	шквалы, смерчи	Смоленская обл.	489.5	512.8	(Доклад..., 2017)
05.07.2017	сильный ветер	Ульяновская обл., Старомайнский район	1197	913	(Схема размещения..., 2020)
30.05.2018	шквал	Ульяновская обл., Старомайнский район	146.6	336.6	(Схема размещения..., 2020)
30.07.2017	шквалы, смерчи	респ. Марий Эл, Моркинский район	323	350	(Центр защиты леса..., 2017)
02.08.2017	смерчи	Новгородская обл., Маревский, Демянский районы	361	700	(Центр защиты леса Новгородской области, 2021)
27.06.2021	шквал	Брянская обл.	857	2440	(Центр защиты леса Калужской области..., 2021)

Для крупнейшего ветровала на ЕТР, вызванного катастрофическим шквалом (деречо) 29.07.2010, доля погибших насаждений от поврежденной площади составила 69,4% (в наиболее пострадавших Новгородской и Ленинградской областях). Для катастрофического ветровала 27.06.2010, также вызванного деречо, доля погибших насаждений составила 43,6% от поврежденной площади. Разница может быть обусловлена породным составом насаждений (на территории, пострадавшей от ветровала 27.06.2010 выше доля лиственных лесов), а также более интенсивными осадками в случае 29.07.2010, которые усиливали ветровую нагрузку. Частично эти вопросы рассмотрены нами в работе (Chernokulsky et al., 2021).

### **Определение дат и времени возникновения ветровалов**

Для последующего анализа характеристик метеорологических явлений, вызвавших ветровалы, необходимо было максимально точно определить даты и время их возникновения. Возможность точного определения дат

определяется доступностью различных исходных данных, в частности частотой получения малооблачных снимков Landsat/Sentinel-2, плотностью сети метеостанций, доступностью данных с метеорологических спутников, наличием информации в дополнительных источниках (таких, как базы данных об опасных явлениях погоды или сообщения в СМИ и социальных сетях). Процесс определения дат (или диапазона дат) возникновения ветровалов состоит из двух последовательных этапов – анализа доступных спутниковых снимков и дополнительной информации.

Данные GFC, на основе которых выделено более 70% всех ветровалов, имеют временное разрешение 1 год. Причем для 24,8% пикселей GFC год, когда произошла потеря лесного покрова, определен с ошибкой (Hansen et al., 2013). Эти ошибки связаны с отсутствием малооблачных снимков и с тем, что при создании продукта GFC используются только снимки за вегетационный период. В результате нарушения лесного покрова обнаруживаются по данным GFC на 1–2 года позже их фактического возникновения. В свою очередь, в данных EEFCC все участки потерь покрова, произошедшие за период 1989–2000 гг., объединены в один класс.

Первым этапом работы было определение диапазона дат появления ветровалов на снимках Landsat/Sentinel-2. Точность определения зависит от частоты получения малооблачных снимков. Доступность снимков Landsat/Sentinel-2 изменяется от года к году. Минимальная частота получения снимков характерна для 2003–2006, 2008 и 2012 гг., когда съемку производил только один спутник Landsat-7, данные которого уже имели дефект SLC-off (Potapov et al., 2015). В эти годы частота получения малооблачных снимков снижалась до 2–4 снимков в год, особенно для северо-восточной части ЕТР, которая отличается минимальной частотой малооблачных дней. В свою очередь, максимальная частота получения снимков (1 раз в 2–3 дня) характерна для 2018–2020 гг., когда были доступны данные с двух спутников Sentinel-2 (A/B), а также Landsat-7 и Landsat-8. Это способствовало резкому повышению точности определения дат ветровалов. Для определения диапазонов дат возникновения ветровалов использовались снимки всех сезонов года, включая осенние и зимние, которые позволили уточнить даты ветровалов, произошедших в конце лета и осенью.

Далее в пределах определенного по снимкам диапазона дат появления ветровалов проводился анализ дополнительной информации, а именно данных ближайших метеостанций, сведений из различных баз данных об опасных метеорологических явлениях, сообщений в СМИ и в социальных сетях, снимков

с метеорологических спутников Meteosat/SEVIRI, и данных систем реанализа CFSR (Saha et al., 2010) и ERA5 (Hersbash et al., 2020). Также информативными источниками были научные публикации, посвященные отдельным штормовым событиям (напр. Алесенков и др., 2006; Дмитриева, Песков, 2013, 2016) или региональные базы данных о ветровалах (Петухов, 2016). В базе данных приведены ссылки на дополнительные источники информации о ветровалах или вызвавших их явлениях для 28,7% ветровалов на ЕТР и 9,7% ветровалов в Сибири (различие обусловлено более высокой плотностью населения в лесной зоне ЕТР в сравнении с Сибирью).

Из данных сети метеостанций в первую очередь использовались сведения о порывах ветра, количестве осадков и метеорологических явлениях (грозах, граде), наблюдавшихся на метеостанциях, расположенных на расстоянии до 100 км по направлению движения шквала или смерча, вызвавшего ветровал. Данные с метеорологических спутников были основным источником для определения времени возникновения ветровалов (процесс их обработки и анализа рассматривается в Главе 4). Данные систем реанализа использовались для выявления дат, когда наблюдались благоприятные условия для возникновения шквалов и смерчей, что позволило в ряде случаев уточнить диапазон дат или даже определить точную дату события (Shikhov, Chernokulsky, 2018).

В результате удалось определить точную дату возникновения 493 ветровалов на ЕТР и 284 ветровалов в Сибири (56,2% и 43,2% соответственно). В том числе даты определены успешно для 43,7% ветровалов, вызванных смерчами и 59,0% ветровалов, вызванных иными типами явлений. За период, наименее обеспеченный спутниковыми снимками Landsat (2003–2006 гг.) определены даты возникновения лишь 18,2% ветровалов, а в 2016–2020 гг. когда стали доступны снимки Sentinel-2, доля ветровалов с известными датами достигла 75,8% (на ЕТР 87,2%).

Доля смерчевых ветровалов с известными датами меньше, чем у прочих ветровалов, поскольку смерчи имеют более локальный характер и крайне редко фиксируются метеостанциями. Большинство смерчей также проходит между населенными пунктами, и не фиксируются никаким другим способом, кроме как по спутниковым снимкам ветровалов. В свою очередь шквалы и сильные ветры не конвективной природы охватывают большие территории, чем смерчи, и чаще фиксируются по данным метеостанций и по нанесенному ущербу. Также доля ветровалов с установленными датами в Сибири меньше, чем на ЕТР, в связи с более низкой плотностью наблюдательной сети и населения, что не позволяет

связать выявленные ветровалы с известными штормовыми событиями.

*Время возникновения ветровалов оценивалось тремя способами:*

- по срочным данным наблюдений ближайших метеостанций (с точностью 3 ч);
- по данным геостационарных метеорологических спутников, обеспечивающим высокую повторяемость съемки (преимущественно Meteosat-8, для шести случаев в Сибири – HIMAWARI-8), время возникновения ветровалов определялось с точностью от 15 мин до 2 ч;
- по иным источникам данных о метеорологических явлениях, вызвавших ветровал, время события определялось с точностью от 1 мин до 12 ч.

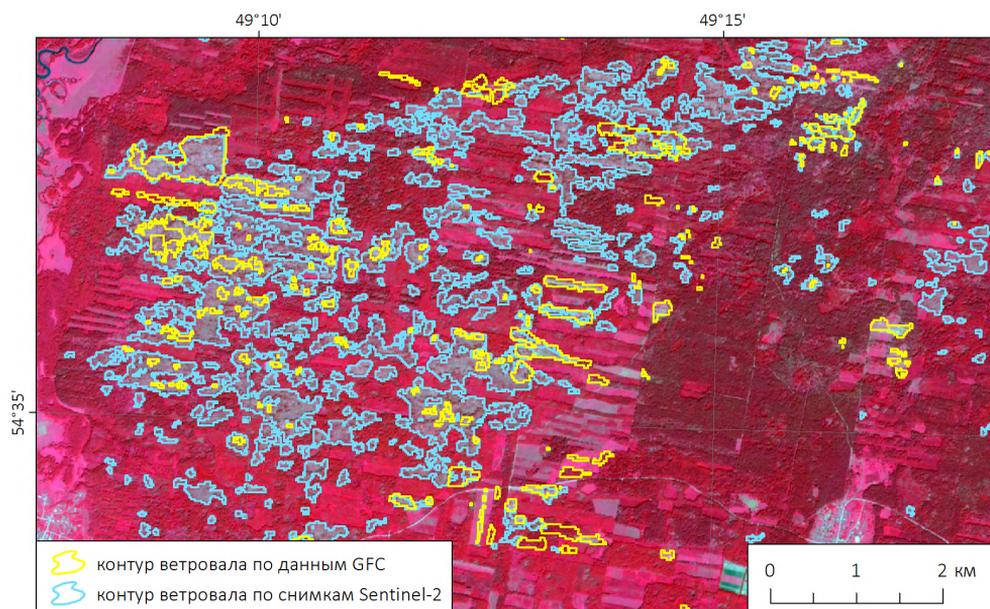
Всего удалось определить время возникновения для 40,6% ветровалов на ЕТР и 26,0% ветровалов в Сибири. Таким образом, время возникновения было определено для 67,8% ветровалов с известными датами. Наиболее значимым источником данных о времени возникновения ветровалов были спутниковые снимки Meteosat-8 IODC, которые с 2017 г. доступны в высоком качестве для всей ЕТР (Klaes et al., 2017). В связи с этим, на ЕТР доля ветровалов с известным временем возникновения в 2017–2020 гг. достигает 82,7%, а в предшествующий период составляет всего 29,7%. Также это объясняет значительное более успешное определение времени возникновения ветровалов на ЕТР в сравнении с Сибирью.

#### **2.4. Основные ограничения методики и полученных данных**

Созданные базы данных о ветровалах в лесной зоне ЕТР и Сибири являются неполными, а также неоднородными в пространственном и временном аспектах. Временной аспект связан с тем, что со временем происходил рост доступности данных, использованных для поиска ветровалов, что приводило к снижению вероятности их пропуска. Пространственная неоднородность обусловлена тем, что в разных районах лесной зоны вероятность пропуска ветровалов меняется в зависимости от лесистости, породного состава древостоя и характера лесопользования.

Точность полученных данных определяется точностью продуктов GFC и EEFCC, по которым было выделено большинство ветровалов. Ветровалы,

которые не идентифицируются как нарушения лесного покрова в данных GFC и EEFCSS, либо их площадь сильно занижена, с высокой вероятностью могли быть пропущены при заполнении базы данных. Эффективность методики снижается по мере уменьшения доли лесопокрытой территории, а также по мере увеличения доли площади мелколиственных или широколиственных лесов, площадь ветровалов в которых может недооцениваться в 2-3 раза. Пример такой недооценки для случая крупного ветровала 05.07.2017 г. в Ульяновской области приведен на рис. 2.16. В целом наибольшая вероятность пропуска или занижения площади ветровалов характерна для южной части лесной зоны ЕТР и юга Западной Сибири. Для минимизации возможных пропусков проводилась верификация данных по снимкам Landsat/Sentinel-2, корректировка контуров ветровала, или использовался другой способ выделения (непосредственно по снимкам Landsat/Sentinel-2). Некоторые ветровалы в лиственных лесах были оконтурены вручную по снимкам с открытых картографических сервисов.



**Рис. 2.16.** Сопоставление контуров ветровала 05.07.2017 г. в Ульяновской области, выделенного по данным GFC и по разновременным снимкам Sentinel-2. В качестве подложки использован снимок Sentinel-2 за 16.07.2017 г.

В ряде регионов Сибири, прежде всего в Иркутской области и в Ханты-Мансийском АО идентификация ветровалов затрудняется широким распространением лесных гарей, на которые приходится до 20-40% лесопокрытой площади (Tuukavina et al., 2022). Крупные пожары на ветровалах, затрудняющие оценку площади последних, наблюдались в 2005-2007 гг. в Иркутской области, в 2010 г. на севере Свердловской области и в 2012-2013 гг. в Ханты-Мансийском АО (Шихов и др., 2022).

Проблемой для идентификации ветровалов по спутниковым данным является также проведение лесохозяйственных мероприятий (санитарных рубок), в результате которых ветровалы теряют свои характерные геометрические особенности. Это отмечено еще в работе (Baumann et al., 2014). Однако в большинстве случаев между ветровалом и проведением лесохозяйственных мероприятий проходит большой интервал времени (до нескольких лет), а в труднодоступных районах они не проводятся вовсе. В южной части лесной зоны ЕТР влияние этого фактора более существенно, и он также может способствовать занижению площади ветровалов.

Полученные данные о ветровалах наиболее репрезентативны для регионов с наибольшей лесистостью (свыше 80%) и значительной долей хвойных лесов, таких как южная часть Архангельской области и Республики Коми на ЕТР, Томская область и район Енисейского кряжа в Сибири. На данной территории по ветровалам выявляется подавляющее большинство случаев сильных шквалов и смерчей (Чернокульский и др., 2021).

Неоднородность полученных данных во времени обуславливает несколько факторов.

1. Основным фактором неоднородности данных является использование двух различных продуктов обработки данных Landsat – EEFCC за 1986–2000 гг. и GFC за 2001–2020 гг. Данные GFC отличаются более высокой точностью выделения нарушений лесного покрова и более высоким временным разрешением, чем EEFCC, что повышает вероятность успешного обнаружения ветровалов. В результате среднегодовое количество ветровалов, выявленных за 2001–2020 гг. оказалось в 2,5 раза больше, чем за 1986–2000 гг.

Для оценки значимости различий геометрических характеристик ветровалов (площади, длины, средней и максимальной ширины) между двумя выборками, полученными за периоды 1986-2000 и 2001-2020 гг., использован тест Колмогорова-Смирнова. Для ветровалов, вызванных

смерчами, значения всех геометрических характеристик в 1986-2000 гг. оказались статистически значимо выше, чем за 2001-2020 гг. В частности, медианное значение площади за 1986-2000 гг. составляет 46,6 га, а за 2001-2020 гг. – 29,4 га, а длины – 6,7 км и 5,3 км соответственно. Для ветровалов, вызванных шквалами, выявлены статистически значимые различия по площади, а также по средней и максимальной ширине. Медианное значение площади составляет соответственно 198 га и 103 га. Это однозначно указывает на недооценку числа случаев смерчевых ветровалов за период до 2000 г. и на то, что выборки ветровалов, выделенных за период 1986-2000 и 2001-2020 гг. не принадлежат к одной генеральной совокупности.

2. Алгоритм, на основе которого рассчитывается продукт GFC, претерпел существенные изменения в 2013 и 2015 гг., в связи с чем эти данные также нельзя считать однородными (Chirici et al., 2020).
3. Появление снимков высокого разрешения на открытых картографических сервисах с 2002–2003 гг. способствовало более успешной идентификации смерчевых ветровалов. В результате ежегодное число ветровалов, вызванных смерчами, значительно увеличилось с 2004 г.
4. Запуск спутников миссии Sentinel-2 в 2015 и 2017 гг., обеспечивающих получение снимков каждые 2–3 дня с пространственным разрешением 10 м способствовал повышению эффективности обнаружения ветровалов, в том числе в квазиоперативном режиме.
5. Низкая повторяемость съемки Landsat в 2003–2006, 2008 и 2012 гг., когда на орбите действовал только спутник Landsat-7, привела к снижению точности определения дат ветровалов, а также, возможно, и к пропуску некоторых ветровалов за эти годы.

Перечисленные источники неоднородности являются основными. Дополнительным источником неоднородности может быть значительное снижение объема лесозаготовок, произошедшее в 1990-х и начале 2000-х гг. в сравнении с 1980-ми гг., особенно на северо-востоке ЕТР (Potapov et al., 2015). Это могло привести к снижению вероятности пропуска ветровалов уже с 1990-х гг., поскольку ветровалы с меньшей вероятностью перекрывались с вырубками. Тенденция снижения объемов лесозаготовок могла относиться и к проведению лесохозяйственных мероприятий на ветровалах.

Существенным ограничением использованной методики является низкая степень ее автоматизации. Возможности автоматизации ограничены использованием разнородных исходных данных и необходимостью экспертной верификации на ряде этапов работы, прежде всего при определении характеристик метеорологических явлений, вызвавших ветровалы. Для автоматизации процесса выделения ветровалов по данным GFC и EEFCC ограничением является большое разнообразие их формы и отсутствие дополнительных индикаторов того, что конкретное нарушение лесного покрова является именно ветровалом. Таким образом, для ветровалов невозможно применить методику, разработанную для оценки потерь лесов от пожаров в масштабе всей России (Krylov et al., 2014).

Перспективы автоматизации спутникового мониторинга ветровалов в масштабах всей России могут быть связаны скорее не с использованием тематических продуктов, а с применением сверточных нейронных сетей для их распознавания непосредственно по снимкам (Scharvogel et al., 2020). Альтернативный подход к автоматизации отделения ветровалов от других типов нарушений предполагает совместный анализ спектральных, контекстных, временных и топографических характеристик (Oeser et al., 2017). Более подробно этот вопрос рассмотрен в разделе 2.1.

## **ГЛАВА 3**

# **ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ВЕТРОВАЛОВ И ВЫЗЫВАЮЩИХ ИХ ШТОРМОВЫХ СОБЫТИЙ**

### **3.1. Пространственно-временное распределение ветровалов в лесной зоне ЕТР в 1986-2020 гг.**

Созданная база данных ветровалов в лесной зоне ЕТР включает 113498 элементарных участков повреждений древостоя, которые относятся к 876 ветровалам. В свою очередь, эти 876 ветровалов относятся к 585 разным штормовым событиям. Общая площадь ветровалов составляет 3160,5 км<sup>2</sup>, или 0,21% от общей лесопокрытой площади в пределах изучаемого региона.

#### **Метеорологические явления, вызывающие ветровалы**

подавляющее большинство ветровалов на ЕТР (97,7% от их общего количества и 95,2% от общей площади) вызвано конвективными явлениями – шквалами и смерчами (табл. 3.1). Со смерчами связано 482 ветровалов (55% всех объектов в базе данных), однако их общая площадь составляет всего 13,1% от площади всех ветровалов (415 км<sup>2</sup>). В свою очередь на ветровалы, вызванные шквалами (374 случая) приходится 82,1% от общей площади. На соотношение количества шкваловых и смерчевых ветровалов повлияло использование разных порогов минимальной площади (5 га – для смерчевых ветровалов, 25 га – для прочих ветровалов), что обусловлено особенностями их идентификации по спутниковым снимкам (см. п. 2.3.2). В результате доля смерчевых ветровалов оказалась несколько завышенной, однако влияние этого завышения на соотношение площади ветровалов разных типов незначительно.

Ветровалы, вызванные неконвективными явлениями, случаются редко, а их общая площадь составляет около 5% от площади всех ветровалов. В этом состоит важнейшее отличие ЕТР от Западной и Центральной Европы, где основной ущерб для лесного покрова наносят сильные ветры, связанные с глубокими внетропическими циклонами в осенне-зимний период – зимние штормы (Gardiner et al., 2010; Gregow et al., 2017). В созданной базе данных

нет ни одного ветровала, связанного с такими циклонами. Действительно, по мере смещения на восток они существенно ослабевают (Haylock, 2011). Также повреждению древостоя в зимний период препятствует промерзание почвы, хотя в последнее время этот фактор становится менее значимым на фоне наблюдаемого потепления зим. Большинство ветровалов, вызванных штормами неконвективной природы, наблюдается в октябре – ноябре, похожее распределение характерно и для Финляндии (Suvanto et al., 2016).

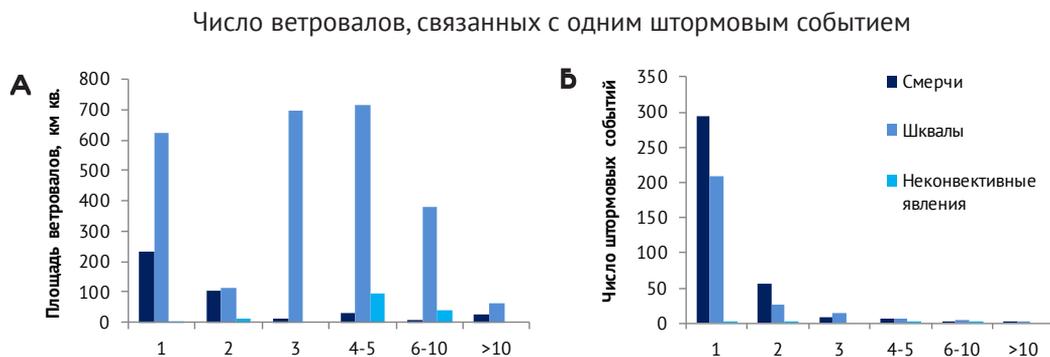
Таблица 3.1.

Распределение ветровалов на ЕТР в зависимости от типов вызвавших их метеорологических явлений (1986-2020 гг.)

Метеорологическое явление, вызвавшее ветровал	Степень достоверности определения	Количество ветровалов	Суммарная площадь, км <sup>2</sup>
Шквал	Высокая	347	2515.9
	Средняя	27	79.8
Смерч	Высокая	373	327.1
	Средняя	109	87.9
Не конвективные явления	Высокая	14	143.8
	Средняя	6	5.9
Всего	Высокая	734	2986.8
	Средняя	142	173.6

Ветровалы в базе данных отнесены к 585 различным штормовым событиям. Из них с 441 событием связан только один ветровал, с остальными 144 событиями – от 2 до 17 ветровалов. Суммарная площадь ветровалов, связанных с этими 144 событиями, составляет 2461,3 км<sup>2</sup> (77,9% от общей площади в базе данных). Таким образом, основной ущерб для лесного покрова связан с так называемыми «вспышками» (outbreaks) шквалов и смерчей (рис. 3.1). Из выделенных 144 событий с возникновением двух и более ветровалов, в большинстве случаев (81%) отмечалось два или три последовательно или параллельно расположенных ветровала. Выявлены три случая, когда с одним штормовым событием, т.е. с прохождением одной мезомасштабной конвективной системы (МКС) было связано более 10 ветровалов на ЕТР: 07.06.2009 г. (17 ветровалов), 27.06.2020 (14 ветровалов) и 30.06.1993 (11 ветровалов). Также в двух случаях отмечались

крупные штормовые события, которые вызвали ветровалы как на ЕТР, так и в Зауралье: 23.06.2007 (17 ветровалов, из них 15 – в Зауралье) и 10.08.2010 (10 ветровалов, из них 5 на ЕТР и 5 в Зауралье).



**Рис. 3.1.** Распределение площади (а) и количества (б) ветровалов, относящихся к одному штормовому событию.

Имеются случаи, когда ветровалы, связанные с одной МКС (с линией шквалов), были отнесены к разным штормовым событиям – например, если они группируются в две или более хорошо различимые параллельные линии, находящиеся на значительном расстоянии друг от друга. Так, ветровалы, связанные с крупнейшей вспышкой смерчей, наблюдавшейся 02.08.2017 г. в Тверской и Новгородской областях (Чернокульский и др., 2021), отнесены в базе данных к трем разным штормовым событиям. Они связаны с тремя мезоциклонами, которые возникли в пределах одной линии шквалов, но в разное время и на значительном расстоянии друг от друга.

Поскольку разделение ветровалов имеет некоторый элемент субъективности, более информативным критерием является площадь ветровалов, связанных с одним штормовым событием. По этому показателю выделяются случаи долгоживущих шквалов (деречо) 29.07.2010 г. на северо-западе ЕТР и 27.06.2010 г. в Ярославской и Вологодской областях, площадь ветровалов от которых составила 639,1 и 490,7 км<sup>2</sup> соответственно, причем для первого случая суммарная площадь достигала 75 тыс. га с учетом ветровалов на территории Финляндии (Chernokulsky et al., 2021).

Иногда с одним и тем же штормовым событием были связаны как шквалы, так и смерчи. В частности, суперячейковые облака могут генерировать смерч и

сильный шквал в области тылового нисходящего потока (RFD) (Karstens et al., 2013). Всего на ЕТР выявлено не менее 38 штормовых событий, с которыми были связаны как шкваловые, так и смерчевые ветровалы.

Некоторые ветровалы, включенные в базу данных как один объект, вызваны двумя типами явлений (смерчем и шквалом). В этом случае тип ветровала определялся по явлению, с которым связана преобладающая площадь повреждений, а достоверность оценки указывалась как средняя. Крупнейший ветровал, имеющий признаки шквалового и смерчевого в разных частях полосы повреждений, произошел 12.06.2010 г. в Костромской области. Он имеет площадь 3042 га при протяженности 66,6 км и максимальной ширине 5033 м.

### **Характеристики метеорологических явлений по данным метеостанций**

Исследуемая территория (за исключением Московской области) характеризуется низкой плотностью сети метеостанций, среднее расстояние между метеостанциями составляет 53,7 км. В результате только для 22% ветровалов, включая 8,7% смерчевых и 38% прочих, была получена информация о порывах ветра ( $\geq 15$  м/с) с ближайших метеостанций. Для наиболее крупных ветровалов ( $S > 1000$  га) соотношение иное – они подтверждены по данным метеостанций в 58% случаев. Однако шквал, вызвавший самый крупный ветровал за весь рассматриваемый период (29.07.2010 г. в Новгородской области на площади свыше 34 тыс. га) не был зафиксирован ни одной метеостанцией.

Из случаев, зафиксированных метеостанциями, 67 раз скорость порывов ветра составляла 20–24 м/с, 41 раз достигала критерия опасного явления ( $\geq 25$  м/с). Четыре ветровала связаны с тремя случаями ураганных скоростей ветра (31.05.1988 г. в Оханске 33 м/с, 15.06.2007 г. в Объячево 34 м/с и 08.07.2020 г. в Суре 33 м/с). Также в 69 случаях на ближайшей метеостанции отмечались сильные дожди ( $\geq 15$  мм за 12 ч), из них 11 – очень сильные ( $\geq 50$  мм за 12 ч). Информация о порывах ветра и количестве осадков включена в базу данных. Стоит отметить, что она получена по неполной выборке, так как за период 1986–2005 гг. были доступны архивы данных только по реперным метеостанциям Росгидромета, за исключением территории Пермского края.

Для оценки критической скорости ветра, вызывающей ветровалы, представляют интерес случаи, когда шквал или смерч прошел непосредственно над метеостанцией. Для этого была сформирована выборка ветровалов, для которых расстояние до ближайшей метеостанции составило 5 км и менее. Учитывая низкую плотность сети метеостанций, таких случаев выявлено

всего 30, из них данные о порывах ветра доступны для 18 случаев. В выборку включены также ветровалы, расстояние от метеостанции до которых составляло до 10 км, но при этом станция находилась точно на линии движения шквала/ смерча. Учитывались и случаи ветровалов за 1984 и 2021-2022 гг., не включенные в общую базу данных (табл. 3.2).

Таблица 3.2  
Случаи ветровалов, наблюдавшиеся  
в непосредственной близости от метеостанций

Тип явления, вызвавшего ветровал	Дата	WMO ID метеостанции и расстояние до нее (км)	Порыв ветра и время (ВСВ), когда он наблюдался	Дополнительная информация о метеоявлениях	Площадь ветровала, га
Смерч	25.08.1984	28016 (9)	27 (12.00)	-	88
Сильный ветер	07.08.1987	26479 (7)	28 (12.00)	Сильный дождь 79 мм/24 ч	2452
Шквал	31.05.1988	28321 (1)	33 (12.00)	Сильный дождь 15 мм/12 ч	52
Шквал	18.06.1990	28313 (2)	30 (15.00)	-	2442
Смерч	29.06.1993	28216 (3)	18 (21.00)	-	143
Шквал	01.06.2007	28621 (3)	25 (12.00)	-	2329
Шквал	16.06.2009	27281 (8)	30 (14.00)	-	7832
Шквал	16.06.2009	27097 (2)	28 (16.00)	-	1231
Шквал	12.06.2010	27227 (2)	18 (18.00)	Сильный дождь 15 мм/12 ч	406
Шквал	27.06.2010	22974 (2)	32 (15.00)	Осадков не было	23328
Шквал	27.06.2010	27051 (3)	16 (15.00)	-	23328
Шквал	29.07.2010	22891 (1)	30 (21.00)	Сильный дождь 17 мм/12 ч	11594

Тип явления, вызвавшего ветровал	Дата	WMO ID метеостанции и расстояние до нее (км)	Порыв ветра и время (ВСВ), когда он наблюдался	Дополнительная информация о метеоявлениях	Площадь ветровала, га
Шквал	18.07.2012	28016 (2)	21 (12.00)	Сильный дождь 27 мм/12 ч, град диаметром 18 мм	3801
Шквал	18.07.2012	28105 (1)	27 (15.00)	–	496
Шквал	27.06.2016	27538 (5)	26 (09.00)	Сильный дождь 26 мм/3 ч	176
Шквал	29.05.2017	27538 (9)	27 (15.00)	–	392
Смерч	13.07.2016	27612 (3)	21 (21.00)	–	36
Смерч	30.07.2017	27498 (10)	25 (21.00)	–	129
Шквал	02.08.2017	26389 (4)	15 (18.00)	Сильный дождь 21 мм/12 ч	359
Шквал	05.06.2019	28007 (10)	24 (18.00)	Сильный дождь 34 мм/3ч, град	54
Шквал	27.06.2020	27295 (1)	14 (12.00)	–	116
Смерч	27.06.2020	28402 (10)	22 (15.00)	Сильный дождь 16 мм/12 ч	242
Шквал	08.07.2020	22676 (1)	33 (15.00)	Сильный дождь 26 мм/12 ч	5553
Шквал	15.05.2021	27355 (2)	19 (18.00)	–	12362
Шквал	15.05.2021	27252 (2)	30 (18.00)	–	12362
Шквал	15.05.2021	27164 (7)	21 (18.00)	–	875
Шквал	12.05.2022	26894 (1)	24 (18.00)	–	857
Шквал	11.07.2022	26795 (2)	19 (18.00)	Сильный дождь 18 мм/3 ч	2571

Серым выделены случаи, не включенные в основную базу данных.

Всего было выделено 28 случаев ветровалов, прошедших вблизи метеостанций (на расстоянии 1–10 км), в том числе 5 вызваны смерчами, 22 – шквалами и один – сильным ветром неконвективного характера. При этом не зафиксировано ни одного случая, когда метеостанция попала непосредственно в зону сплошного ветровала. В случаях со смерчами явление отмечалось на расстоянии 3–10 км от метеостанции. Единственный эпизод прохождения смерча непосредственно над метеостанцией наблюдался 30.07.2017 г. в Карпогорах (Архангельская область), при этом был отмечен порыв ветра 41 м/с (Чернокульский и др., 2021). Однако он не включен в базу данных ветровалов, так как площадь повреждения древостоя смерчем составила менее 5 га.

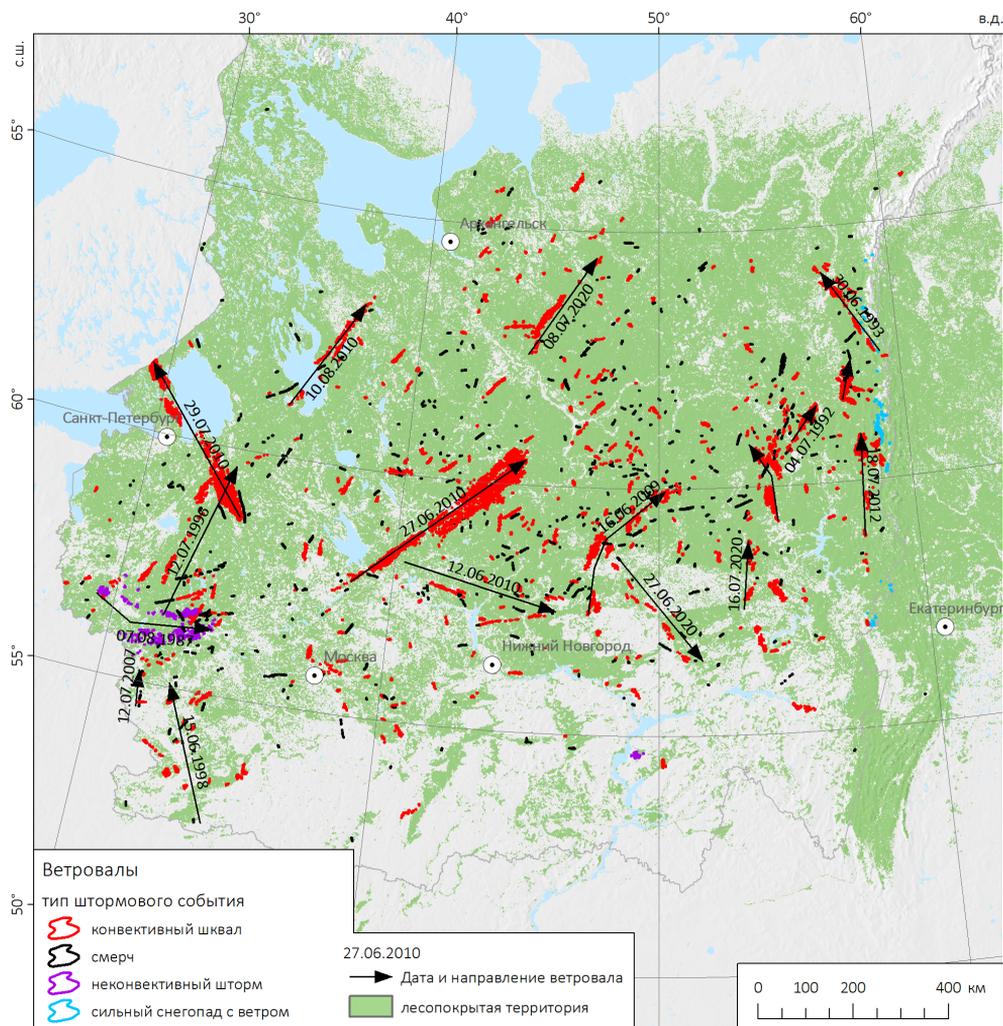
При прохождении ветровала в непосредственной близости от метеостанции, измеренная скорость порывов ветра составила от 14 до 33 м/с (в 17 случаях  $\geq 25$  м/с). Таким образом, даже при прохождении шквала или смерча вблизи метеостанции сильные порывы ветра фиксируются далеко не всегда, что объясняется их локальным характером, либо ветровой защищенностью метеостанции. Для наиболее крупных ветровалов ( $S > 1000$  га) скорость ветра превышала 25 м/с во всех случаях, кроме 18.07.2012 г. и 11.07.2022 г. Шквалы и смерчи сопровождалась ливневыми осадками, часто сильными. Исключением является случай 27.06.2010, когда на метеостанции Нюксеница наблюдался шквал 32 м/с без осадков, вызвавший ветровал.

Согласно оценкам, полученным на основе механистических (tree-based) моделей подверженности ветровалам, сплошной ветровал в большинстве типов насаждений возможен при скорости ветра 40 м/с, а в наиболее подверженных участках перестойных смешанных и хвойных лесов достаточно скорости ветра свыше 20 м/с (Anuomi et al., 2017). В целом полученные данные показывают, что эти оценки реалистичны и для исследуемой территории. Вопрос о доле случаев сильных шквалов, которые приводят к ветровалам, рассматривается в Главе 5 на примере территории ЦФО и Пермского края.

### **Пространственное распределение ветровалов на ЕТР**

Ветровалы наблюдаются в пределах всей лесной зоны ЕТР (рис. 3.2). Их максимальная плотность отмечается вблизи 60° с.ш. и в целом совпадает с областью наибольшей лесистости. Северная граница распространения ветровалов проходит вблизи Полярного Круга, и совпадает с лесотундровой зоной и границей распространения высокоствольных лесов. Всего выявлено 13 ветровалов к северу от 65° с.ш., из них один – за Полярным Кругом, причем все они вызваны конвективными явлениями – шквалами (7) и смерчами (6).

Распределение их во времени также равномерно – 5 из 13 таких ветровалов произошли до 2000 г., а последний известный случай наблюдался 09.07.2020 г.



**Рис. 3.2.** Пространственное распределение сплошных ветровалов на ЕТР за 1986–2020 гг.

Указаны даты крупнейших по площади ветровалов за рассматриваемый период. Лесистость оценена по Карте растительности России (Барталев и др., 2011, 2016).

Самые южные ветровалы выявлены в лесостепной зоне (Липецкая, Тамбовская, Ульяновская области). При этом площадь ветровалов в южной части исследуемой территории, где лесистость составляет менее 50%, вероятно занижается из-за вышеописанных ограничений использованной методики (см. п. 2.4).

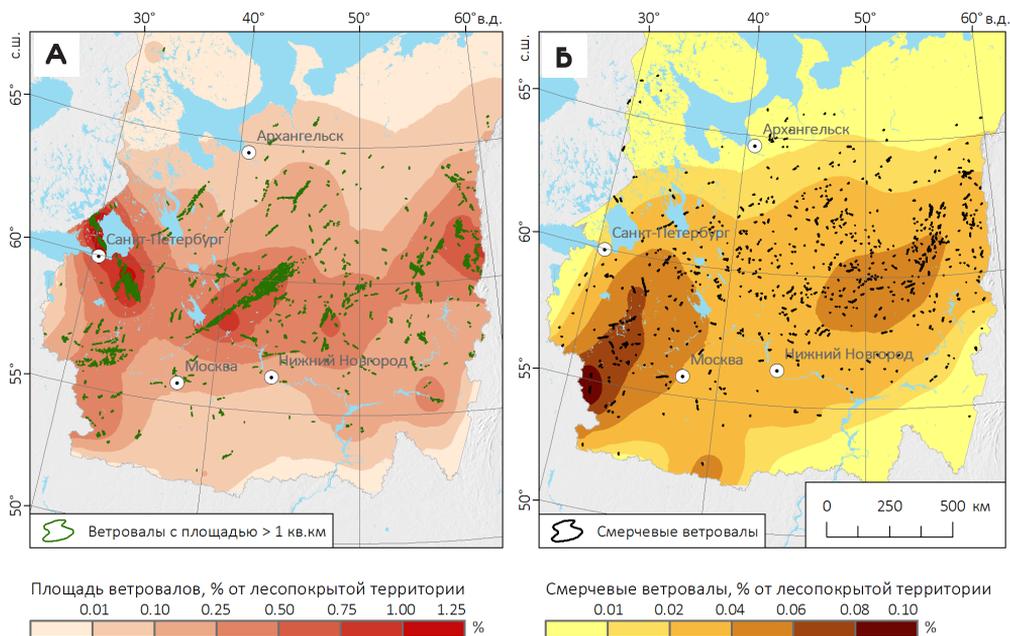
Рассчитана доля площади всех ветровалов и смерчевых ветровалов от лесопокрытой территории (рис. 3.3 а). Расчет производился по ячейкам регулярной сетки размером 100×100 км, лесистость в ячейках оценивалась по Карте растительности России (Барталев и др., 2011, 2016). Рассчитанные значения интерполировались методом локальных полиномов с применением модуля ArcGIS Geostatistical Analyst, для получения сглаженной поверхности с минимумом локальных неоднородностей, которые определяются расположением наиболее крупных ветровалов. На большей части ЕТР доля сплошных ветровалов 1986–2020 гг. от общей площади лесов составляет менее 0,1%. Выделяются три максимума со значениями от 0,5% до 1,1%.

Основной максимум расположен в Новгородской области и связан с крупнейшим ветровалом 29.07.2010 г. Однако на этом же участке отмечались крупные ветровалы от смерчей 24.07.1993 г. и шквала 12.07.1996 г. Этот максимум можно считать объективным. Также он совпадает с одним из максимумов для смерчевых ветровалов (рис. 3.3 б).

Второй максимум находится в Ярославской и Вологодской областях, и связан с ветровалом 27.06.2010 г. Появление этого максимума скорее является случайным, так как обусловлено одним ветровалом. Также сам максимум смещен к югу от зоны максимальной лесистости.

Третий максимум расположен на западном склоне Северного Урала и связан с множеством крупных ветровалов (30.06.1993, 07.06.2009, 10.08.2010, 18.07.2012, 08.10.2015 гг.). Данная территория включает крупнейший на ЕТР ареал первичных темнохвойных лесов (Восточноевропейские леса... 2004) и прилегающие вторичные лесные массивы. Высокая подверженность лесов Северного Урала ветровалам хорошо известна (Lässig, Močálov, 2000; Shikhov et al., 2019). Она может быть обусловлена рядом факторов, включая широкое распространение спелых и перестойных насаждений, максимальное на ЕТР количество осадков и как следствие высокую влажность почвы, каменистые почвы в горной местности и др. Примечательно, что в этой же области отмечался крупнейший на ЕТР ветровал, вызванный гололедными явлениями – отложением мокрого снега 08.10.2015 г.

Также можно выделить вторичный максимум в Тверской области в районе Центрально-Лесного заповедника, где крупные ветровалы наблюдались пять раз за последние 35 лет – 07.08.1987, 12.07.1996, 25.07.2000, 02.08.2017 и 02.08.2021 г.



**Рис. 3.3.** Отношение площади ветровалов к площади лесопокрытой территории на ЕТР: для всех ветровалов (а) и для ветровалов, вызванных смерчами (б).

В распределении ветровалов, вызванных смерчами, выделяются два максимума: на севере Кировской области, юго-востоке Архангельской области, юго-западе Республики Коми и северо-западе Пермского края (1), а также в Смоленской, Тверской и Новгородской областях (2). Здесь доля площади ветровалов, вызванных смерчами, от общей площади лесов достигает 0,06–0,10%, в то время как на большей части ЕТР она не превышает 0,02% (рис. 3.3). Первый максимум был выявлен по данным о случаях смерчей за 2001–2014 гг. (Shikhov, Chernokulsky, 2018) и подтвердился по более полному ряду наблюдений. В данной области сильные смерчи наблюдались в 2005, 2006, 2009, 2012, 2013, 2017, 2019 и 2020 гг. Примечательно, что этот максимум совпадает с областью максимальной лесистости на ЕТР (свыше 90%). В области

второго максимума лесистость не превышает 80%. Наиболее значительные вспышки смерчей здесь наблюдались в 1991, 1993, 2000, 2017, а также 2021 гг.

Полученные данные существенно отличаются от ранее опубликованных оценок смерчопасности ЕТР (Снитковский, 1987; Брюхань и др., 1989). В этих работах к регионам с максимальным риском возникновения смерчей были отнесены Беларусь, Прибалтика, часть территории ЦФО и Нижегородская область. Вероятно, новые данные также более объективны, так как получены по более полной выборке (482 случая смерчевых ветровалов за 35 лет), и рассчитаны с учетом доли лесопокрытой территории. Сравнивая данные о распределении смерчей с климатическими характеристиками диагностических переменных (индексов смерчопасности), рассчитанными по данным реанализа (Taszarek et al., 2020б), можно отметить, что выявленные максимумы смещены к северо-востоку относительно области с наибольшими значениями индексов.

Помимо реального распределения случаев сильных ветров и смерчей, ключевое влияние на пространственное распределение ветровалов оказывает породно-возрастной состав лесных насаждений (Скворцова, 1983; Ulanova, 2000; Dobbertin, 2002). Однако оценить это влияние на мелком масштабе затруднительно, в том числе в связи с отсутствием карт характеристик насаждений на начало исследуемого периода. Поэтому данная оценка была выполнена для отдельных крупных ветровалов (см. раздел 3.4).

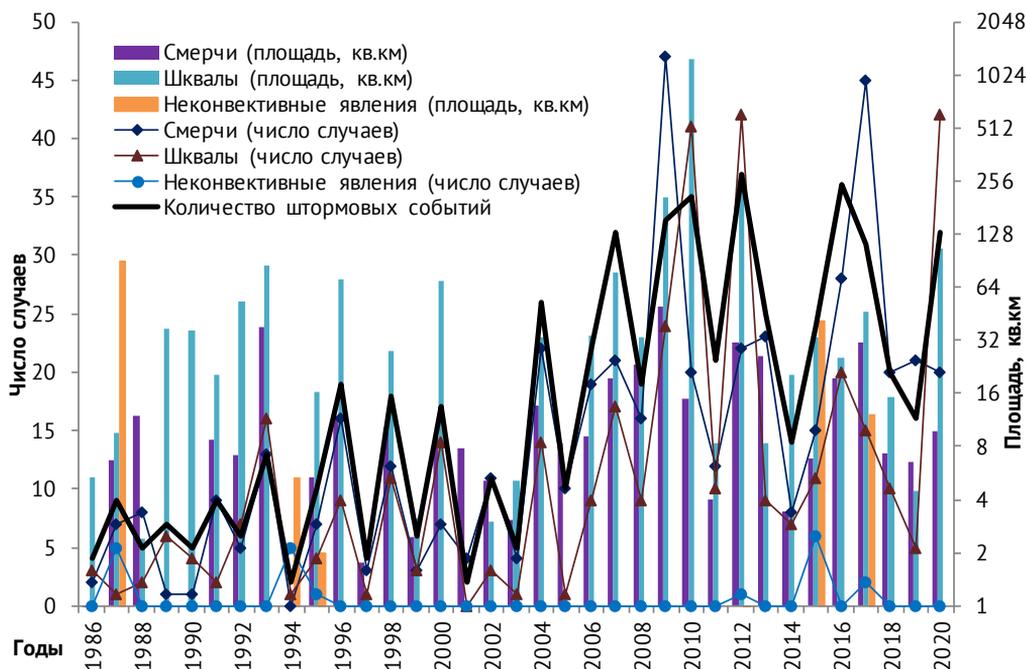
## **Распределение ветровалов и штормовых событий во времени**

### **Межгодовая изменчивость**

Из 876 ветровалов, выявленных на ЕТР, год возникновения был успешно определен для всех событий, а месяц возникновения – для 74,6% из них, в том числе 73,2% смерчевых и 76,3% прочих ветровалов. Даты удалось точно определить для 56,2% ветровалов, включая 46,9% смерчевых и 67,7% прочих. На них приходится 88,3% от общей площади ветровалов. Среди 51 крупнейших ветровалов с площадью более >1000 га (за 1986-2020 гг.) точная дата возникновения неизвестна только для пяти.

Количество и площадь ветровалов испытывает сильные межгодовые колебания (рис. 3.4). Наибольшая площадь ветровалов (1279 км<sup>2</sup>) была зафиксирована в 2010 г. в связи с прохождением двух долгоживущих шквалов (деречо), вызвавших катастрофические ветровалы 27.06.2010 и 29.07.2010. Также по общей площади ветровалов выделяются 2009 и 2012 гг. (свыше

250 км<sup>2</sup>). Наибольшее число смерчевых ветровалов наблюдалось в 2009 и 2017 гг. (47 и 45 соответственно), причем их суммарная площадь в 2009 г. была существенно больше (свыше 50 км<sup>2</sup>). Число ветровалов, вызванных шквалами, было наибольшим в 2010, 2012 и 2020 гг. (свыше 40 случаев). Общее количество штормовых событий, вызвавших ветровалы, имеет схожую динамику – минимумы отмечались в 1994, 1997 и 2001-2003 гг., а максимумы – в 2012 и 2016 гг.



**Рис. 3.4.** Межгодовая изменчивость количества ветровалов на ЕТР, вызванных разными метеорологическими явлениями, и их площади (1986-2020 гг.).

Наблюдаемый рост количества ветровалов имеет «инструментальный» характер и связан с неоднородностью в исходных данных (см. п. 2.4). В течение изучаемого периода появлялись новые источники данных, что способствовало повышению точности идентификации ветровалов. Основными источниками неоднородности данных во времени являются использование разных продуктов обработки данных Landsat (до 2001 г. – EEFCC, с 2001 по 2020 г. – GFC), доступность с 2003–2004 гг. снимков высокого разрешения с открытых сервисов (2), и запуск спутников Sentinel-2 в 2015 и 2017 гг. (3).

За счет совокупного влияния первых двух факторов количество и площадь ветровалов существенно возросли с 2004 г. Так, если в 1986–2003 гг. среднегодовое количество выявленных ветровалов составляло 11, то в 2004–2020 гг. – 38. Внутри этих периодов (1986–2003 и 2004–2020 гг.) восходящий тренд по количеству и площади ветровалов не прослеживается, а максимумы и минимумы могут рассматриваться как объективные. Так, в первом периоде наибольшее количество и площадь ветровалов отмечено в 1993, 1998, 1998 и 2000 гг., а во втором периоде – в 2009–2010, 2012, 2017 и 2020 гг. Минимумы приходятся на 1994, 1997, 2001, 2003, 2011, 2014, 2019 гг. Межгодовая изменчивость обусловлена особенностями атмосферной циркуляции в разные годы. Некоторые из них рассмотрены в п. 3.1.

Перечисленные факторы неоднородности в большей степени влияют на идентификацию небольших ветровалов, поэтому многолетние тренды целесообразно оценивать только для крупных ветровалов (выбран порог  $S \geq 100$  га), пропуск которых менее вероятен в течение всего рассматриваемого периода. На основе оценочной функции Тейла-Сена были рассчитаны линейные тренды количества и площади ветровалов и оценена их значимость по непараметрическому тесту Манна-Кендалла (табл. 3.3). Выбор функции Тейла-Сена обусловлен ее устойчивостью к выбросам и практикой применения в климатологических исследованиях (см. напр. Chernokulsky et al., 2019).

Таблица 3.3

Коэффициенты наклона линии тренда годового количества (случаев/год) и площади (км<sup>2</sup>/год) ветровалов (в числителе) и Р-значение (в знаменателе).  
Учитываются только ветровалы площадью свыше 100 га

Ветровалы	Количество	Площадь
Смерчевые	0.04/0.17	0.13/0.15
Прочие	0.18/0.01	0.38/0.26

Прим.: Выделены статистически значимые тренды

Статистически значимый тренд выявлен только для количества ветровалов, не связанных со смерчами. Для количества и площади смерчевых ветровалов тренд статистически не значим. При анализе трендов необходимо учитывать тот факт, что на них существенно влияют не только частота и интенсивность метеорологических явлений, вызывающих ветровалы, но и изменения

породного состава и возрастной структуры лесов (Schelhaas et al., 2003; Gregow et al., 2017). Получение данных о таких изменениях на ЕТР и их связи с ветровалами требует проведения дополнительных исследований.

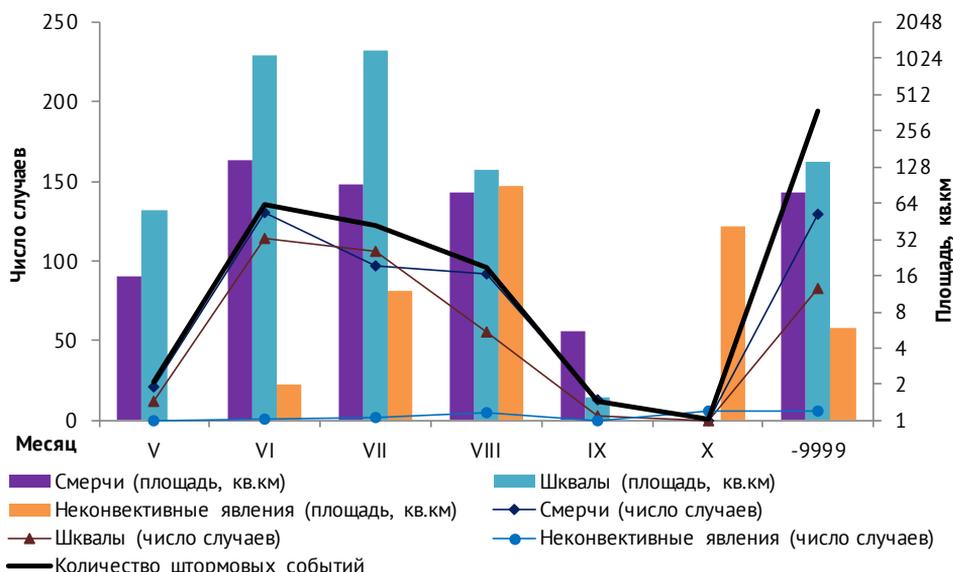
### **Внутригодовое распределение**

Ветровалы на ЕТР наблюдаются в период с мая по октябрь (рис. 3.5). Период их возникновения соответствует сезону конвективных явлений, за исключением ветровалов, вызванных явлениями не конвективного характера. Самые ранние случаи явлений, вызвавших ветровалы (из тех, для которых известна дата), наблюдались 11.05.2019 (шквал, смерч) и 12.05.2007 (смерчи), а самые поздние – 08.10.2015 г. (налипание мокрого снега). Из ветровалов, вызванных конвективными явлениями, самые поздние наблюдались 22.09.2020 г. (смерчи) и 22.09.2018 г. (шквал). Максимум по количеству ветровалов, вызванных шквалами и смерчами, а также штормовых событий в целом, приходится на июнь. Это соответствует ранее опубликованным оценкам внутригодового распределения смерчей (Chernokulsky et al., 2020a). Суммарная площадь ветровалов оказалась наибольшей в июле. В целом более 90% ветровалов отмечается в летний сезон. Диапазон дат наиболее крупных ветровалов ( $S > 10 \text{ км}^2$ ), произошедших в период 1986–2020 гг., лежит между 29 мая и 22 августа, однако в 2021-2022 гг. наблюдались катастрофические ветровалы в первой половине мая (15.05.2021 и 12.05.2022).

Наибольший ущерб для лесного покрова связан с так называемыми «вспышками» (outbreaks) шквалов и смерчей. При этом в течение суток могут возникать от двух до 20 и более ветровалов, связанных с прохождением одной или нескольких мезомасштабных конвективных систем (МКС). Всего на ЕТР выявлено 8 случаев, когда за сутки отмечалось 10 и более ветровалов (табл. 3.4). Для некоторых из перечисленных в табл. 3.4 вспышек в работе (Чернокульский и др., 2021) указано большее число смерчей – например, для вспышки 07.06.2009 г. – 24 смерча, для вспышки 02.08.2017 г. – 56 смерчей. Это объясняется тем, что не все смерчи проходили над лесными массивами, либо площадь некоторых ветровалов была менее 5 га, либо один ветровал мог быть вызван двумя или более смерчами-спутниками.

Таблица 3.4  
Крупнейшие по числу случаев вспышки шквалов и смерчей,  
вызвавшие ветровалы на ЕТР в 1986–2020 гг.

Дата	Число ветровалов и штормовых событий	Распределение ветровалов по типам	Общая площадь, км <sup>2</sup>	Субъекты РФ	Сведения о зафиксированных метеорологических явлениях на станциях
18.07.2012	27/9	шквалы (24) смерчи (3)	209,8	Пермский край, Кировская обл., респ. Коми	Шквалы 20–28 м/с, град до 18 мм, ливневые дожди до 36 мм
07.06.2009	24/5	шквалы (5) смерчи (19)	99,11	Пермский край, респ. Коми	Не зафиксированы
02.08.2017	21/5	шквалы (6) смерчи (15)	31,43	Тверская обл., Новгородская обл.	Шквалы 15–22 м/с, ливневые осадки до 54 мм
12.06.2010	16/6	шквалы (7) смерчи (9)	51,70	Ярославская, Костромская, Нижегородская обл.	Шквалы до 19 м/с
30.06.1993	16/2	шквалы (16)	85,32	Пермский край, респ. Коми	Шквал 24 м/с, ливневый дождь 21 мм
27.06.2020	15/2	шквалы (11) смерчи (4)	19,92	Кировская обл. респ. Татарстан, респ. Марий-Эл	Шквалы 14–25 м/с, ливневые дожди до 16 мм
30.07.2017	14/5	шквалы (6) смерчи (8)	34,37	Архангельская обл. Костромская обл. респ. Марий-Эл	Смерч (порыв ветра 41 м/с), шквалы 20–25 м/с, ливневые дожди до 49 мм
16.06.2009	12/2	шквалы (10) смерчи (2)	130,87	Кировская обл., Нижегородская обл., респ. Коми	Шквалы до 30 м/с, ливневые дожди до 51 мм, град до 29 мм



**Рис. 3.5.** Внутригодовое распределение количества ветровалов на ЕТР, вызванных разными метеорологическими явлениями, и их площади (1986-2020 гг.).

### Суточный ход

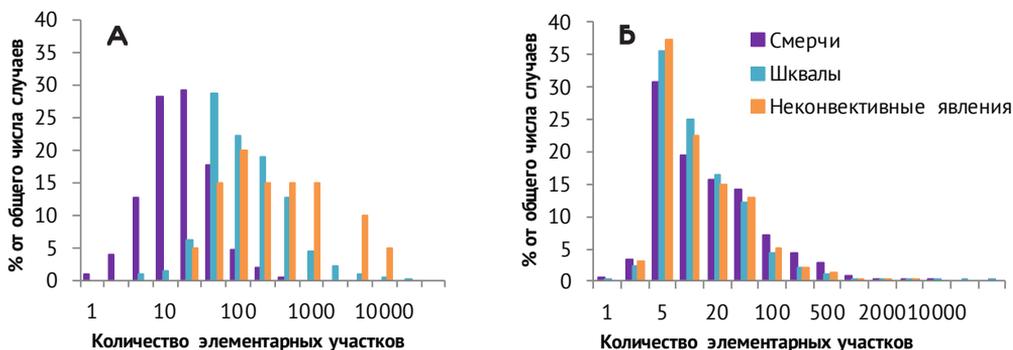
Всего на ЕТР удалось определить время возникновения для 331 ветровала (40,6%), включая 153 смерчевых (31,7%) и 203 прочих (51,5%). Точность определения по данным метеорологических спутников Meteosat составляет от 15 мин до 2 ч, а по данным метеостанций – 3 ч. В результате оценивались данные о времени начала события, приведенные к единому шагу, равному 3 ч.

Подавляющее большинство ветровалов (71%), включая 78% смерчевых и 66% шкваловых, произошли во второй половине дня между 12.00 и 18.00 по ВСВ, что соответствует периоду с 15.00 по 21.00 местного времени для большей части ЕТР. Аналогичная закономерность суточного хода характерна для всех конвективных явлений (Taszarek et al., 2018) и смерчей в Северной Евразии (Chernokulsky et al., 2020). Данные о времени возникновения ветровалов, вызванных явлениями неконвективной природы, известны только приблизительно, ввиду существенной продолжительности этих явлений.

Представляют повышенный интерес случаи возникновения ветровалов ночью или утром, т.е. в период суточного минимума развития конвекции. Так, два крупных ветровала, вызванных шквалами, произошли в утренние часы:

10.08.2010 г. в Карелии и Архангельской области (с 08.00 до 11.00 местного времени) и 08.08.2016 г. в Архангельской области вблизи г. Кораяма (между 09.30 и 11.30 местного времени). Примечательно сходство синоптических условий возникновения этих случаев и связь с эпизодами интенсивной адвекции тропического воздуха (Калинин и др., 2021б). Пять шкваловых и два смерчевых ветровала возникли в середине ночи по местному времени (после 21.00 ВСВ), в том числе крупные ветровалы 12.07.1996 в Тверской и Новгородской областях и 16.07.2020 г. в Удмуртии и Кировской области. Оба этих случая были связаны с интенсивными волнами тепла, когда дневная максимальная температура воздуха достигала отметок +35° и выше (см. подробнее Главу 4).

### Геометрические характеристики ветровалов

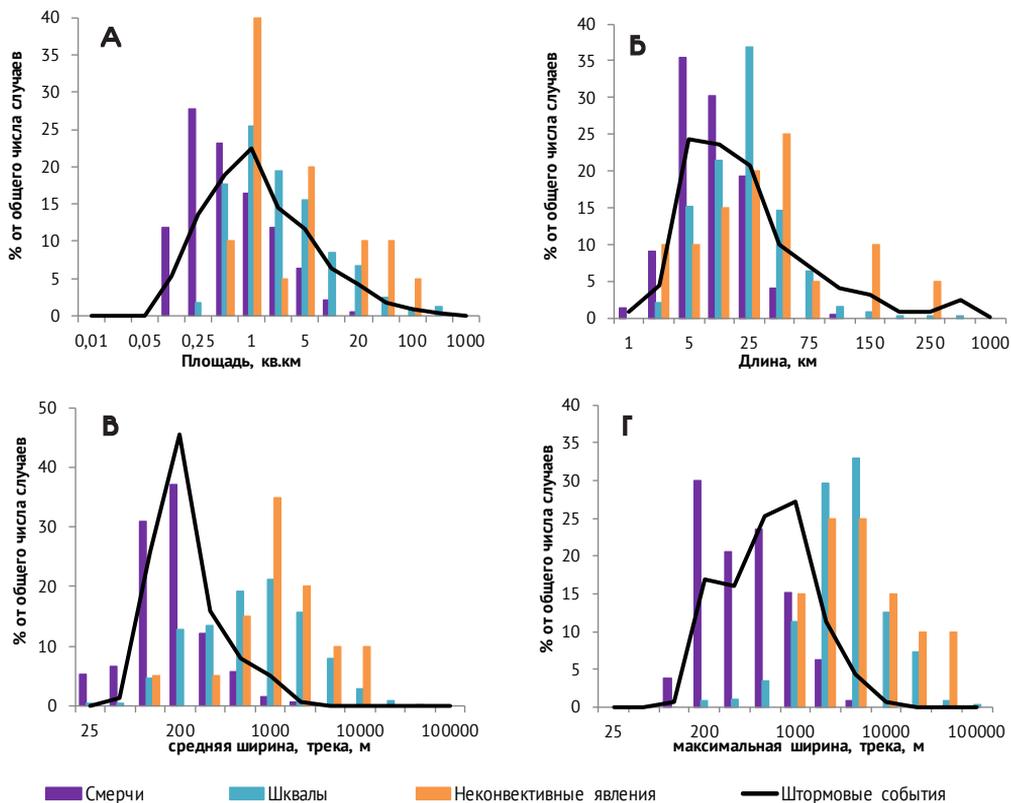


**Рис. 3.6.** Распределение элементарных участков ветровалов по площади (а) и количеству элементарных участков, связанных с одним ветровалом (б).

Площадь элементарных участков ветровалов, включенных в базу данных, различается от 0,18 га (минимальный порог) до 3090 га. Большинство участков – локальные (менее 1 га), но на них приходится всего 10,5% от общей площади ветровалов. Напротив, на 1% самых крупных участков приходится 36,4% от всей площади ветровалов (рис. 3.6 а).

Ветровалы, вызванные смерчами, в среднем включают значительно меньше участков повреждения древостоя, чем вызванные шквалами и неконвективными явлениями (рис. 3.6 б). Большинство смерчевых ветровалов включает от 5 до 20 таких участков, и лишь 2,3% из них включает более 100 участков. В свою очередь, среди прочих ветровалов 40,6% включают более 100 участков, а 4,5% – свыше 1000 участков. Однако этот показатель зависит и от способа выделения ветровала. Для ветровалов, выделенных вручную (всего в базе данных по ЕТР

154 таких объекта), вероятность пропуска небольших по площади участков выше, чем у ветровалов, выделенных по данным GFC, EEFCC или по разности вегетационных индексов.



**Рис. 3.7.** Распределение геометрических характеристик ветровалов и треков штормовых событий: площадь (а), длина (б), средняя и максимальная ширина без исключения разрывов (в, г).

Распределение самих ветровалов по площади также отличается сильной неравномерностью (рис. 3.7 а). Суммарная площадь 10 крупнейших ветровалов на ЕТР составляет 1435,9 км<sup>2</sup>, или свыше 45% от всей площади ветровалов в базе данных. Для треков штормовых событий этот показатель составляет 1772 км<sup>2</sup> (56% общей площади). Основные характеристики крупнейших штормовых событий, с которыми связаны ветровалы на общей площади свыше 50 км<sup>2</sup>,

приведены в табл. 3.5, в ней также даны сведения о событии 15.05.2021 г., не включенном в основную базу данных. Распределение площади ветровалов, вызванных смерчами, является более равномерным по причине их локального характера – на 10 крупнейших смерчевых ветровалов приходится 23,2% общей площади всех ветровалов, вызванных смерчами.

Длина ветровалов изменяется от 0,5 км до 283,6 км, а для треков штормовых событий этот показатель составляет от 0,8 до 559,6 км (рис. 3.7 б). Из ветровалов, вызванных смерчами, 65,5% имеют длину трека в пределах 2–10 км, а среди шкваловых ветровалов, 59% имеют протяженность от 5 до 25 км. Два ветровала, вызванные смерчами 24.07.1993 г. в Новгородской области и 07.08.2012 г. в Ленинградской области, имеют протяженность свыше 75 км, что близко к длине пути Ивановского смерча 09.06.1984 г. (Chernokulsky, Shikhov, 2018).

Распределение длины треков штормовых событий более равномерное, 8 из них имеет протяженность свыше 300 км. Максимальную протяженность имеют треки, связанные с катастрофическими ветровалами 27.06.2010 г. (544,6 км) и 29.07.2010 г. (626 км, из которых 473 км – на территории России). Среди всех штормовых событий на ЕТР, вызвавших ветровалы, эти два случая можно однозначно отнести к категории деречо, поскольку протяженность полосы разрушений (ветровала) превышает 400 км – минимальный критерий для данного явления, согласно (Johns, Hirt, 1987). Более подробно этот вопрос обсуждается в работе (Chernokulsky et al., 2022a), а также в разделе 3.3 настоящей монографии.

Распределение ветровалов по ширине также отличается сильной неравномерностью. Из ветровалов, вызванных смерчами, свыше 75% имеют среднюю ширину менее 200 м, а максимальную – менее 500 м (рис. 3.7 в, г). Наибольшую ширину имели ветровалы от смерчей 24.07.1993 г. в Новгородской области, 12.07.2007 г. в Смоленской области и 26.06.2008 г. в Архангельской области – свыше 1500 м, что также сопоставимо с шириной Ивановского смерча 09.06.1984 (Chernokulsky, Shikhov, 2018).

Ветровалы, вызванные шквалами и неконвективными явлениями, имеют существенно большую ширину, чем смерчевые ветровалы. Максимальная ширина, рассчитанная без исключения разрывов, для 83% из них превышает 1000 м. Наибольшую ширину имеют ветровалы, вызванные деречо 27.06.2010 г. (69,6 км) и 29.07.2010 г. (39,6 км). Также максимальную ширину свыше 45 км имеет ветровал, вызванный сильным ветром при прохождении глубокого южного циклона 07.08.1987 г.

Таблица 3.5

Штормовые события, крупнейшие по общей площади ветровалов на ЕТР

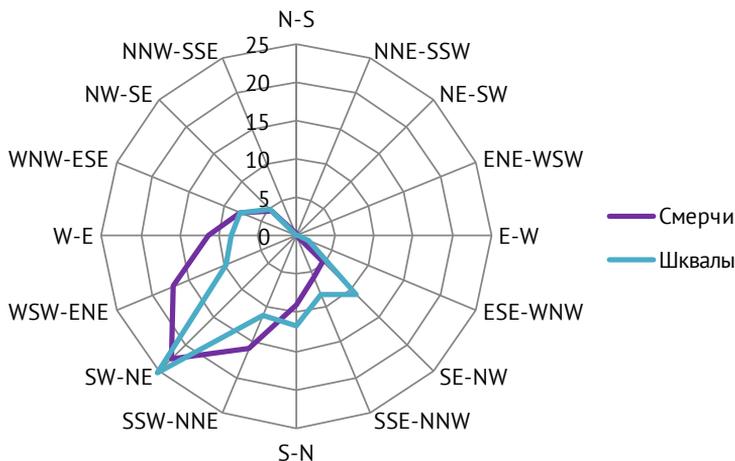
Дата	Общая площадь ветровалов км <sup>2</sup>	Распределение ветровалов по типам	Длина и макс. ширина трека, км	Субъекты РФ	Сведения о зафиксированных метеорологических явлениях на станциях
29.07.2010	639,1*	шквалы (4)	393,7/39,8	Новгородская, ленинградская обл., рес. Карелия	Шквалы до 30 м/с, ливневые дожди до 17 мм
27.06.2010	490,7	шквалы (3)	544,6/69,5	Ярославская, Вологодская, Архангельская обл.	Шквалы до 32 м/с, ливневые дожди до 26 мм, град
16.06.2009	123,9	шквалы (7) смерч (1)	283/43,2	Кировская обл., Нижегородская обл., респ. Коми	Шквалы до 30 м/с, ливневые дожди до 51 мм, град до 29 мм
18.07.2012	101,8	шквалы (7) смерч (1)	308,9/50,1	Пермский край, Свердловская обл.	Шквалы до 25 м/с
18.07.2012	89,4	шквалы (6)	202,0/50,4	Пермский край, респ. Коми	Шквалы 20-24 м/с, град 18 мм, ливневый дождь до 36 мм
08.07.1987	88,9	сильный ветер неконвективного характера (5)	256/102,5	Псковская, Новгородская, Тверская обл.	Сильный ветер (средняя скорость 15-20 м/с, порывы 28 м/с), сильный дождь до 105 мм/24 ч
07.06.2009	67,9	шквалы (1) смерчи (2)	75,1/19,9	респ. Коми	Не зафиксировано
30.06.1993	61,0	шквалы (1)	210,6/35,8	Пермский край, респ. Коми	Шквал 24 м/с, ливневый дождь 21 мм
08.07.2020	57,1	шквалы (3)	313,2/13,2	Архангельская обл.	Шквал 33 м/с, ливневый дождь 26 мм

Дата	Общая площадь ветровалов км <sup>2</sup>	Распределение ветровалов по типам	Длина и макс. ширина трека, км	Субъекты РФ	Сведения о зафиксированных метеорологических явлениях на станциях
04.07.1992	52,6	шквалы (6)	138,7/22,2	Пермский край, респ. Коми	Шквал 28 м/с
15.05.2021	155,5	шквалы (7) смерчи (4)	366,6/52,8	Ивановская, Костромская, Вологодская обл.	Шквалы 18–31 м/с

*Примечание.* \*для события 29.07.2010 приведены данные только по территории России.

Распределение ветровалов по направлению зависит от преобладающего направления ветра при вызывающих их штормовых событиях (рис. 3.8). Еще в работе (Снитковский, 1987) было показано, что большинство смерчей на ЕТР перемещается с юго-запада на северо-восток, затем эта закономерность была подтверждена на основе более полной базы данных о смерчах (Chernokulsky et al., 2020). Юго-западное направление является доминирующим не только для смерчевых, но и для шкваловых ветровалов, хотя для них также характерно юго-восточное направление (рис. 3.8). При штормовых событиях, вызвавших наиболее крупные ветровалы (рис. 3.2, табл. 3.5) отмечалось юго-западное, южное и юго-восточное направление движения, в одном случае (27.06.2020) – северо-западное. Эти направления в целом соответствуют 4-м типовым синоптическим ситуациям возникновения смерчей, описанным в (Снитковский, 1987), поскольку условия возникновения смерчей и сильных шквалов имеют немало общего (Калинин и др., 2021б).

Случаи движения шквалов или смерчей, вызвавших ветровалы, с севера на юг или с востока на запад крайне редки (всего 3 смерча и 2 шквала, один из которых наблюдался в 2021 г.). Они возможны в синоптических ситуациях, когда теплый сектор циклона смещен на его северную периферию, либо на восточной периферии блокирующих антициклонов, при условии затока теплого влажного воздуха с северо-запада и наличия струйного течения в средней тропосфере.



**Рис. 3.8.** Распределение ветровалов по направлениям движения. Ветровалы, вызванные явлениями неконвективной природы, исключены по причине малого объема выборки.

### 3.2. Пространственно-временное распределение ветровалов в лесной зоне Западной и Центральной Сибири в 2001-2020 гг.

Созданная база данных ветровалов в лесной зоне Сибири включает 46355 элементарных участков повреждений древостоя, которые относятся к 657 ветровалам. В свою очередь, эти 657 ветровалов относятся к 433 штормовым событиям. Общая площадь ветровалов составляет 1290,2 км<sup>2</sup>, или 0,04% от лесопокрытой площади в пределах изучаемого региона (в 4,5 раза меньше, чем на ЕТР за этот же период времени).

#### Метеорологические явления, вызывающие ветровалы

Как и на ЕТР, большинство ветровалов в Сибири вызвано конвективными явлениями – шквалами и смерчами (табл. 3.6). Со смерчами связано 349 ветровалов (53,1% всех объектов в базе данных), однако их общая площадь составляет всего 14,9% от площади всех ветровалов (191,7 км<sup>2</sup>). На ветровалы, вызванные шквалами (292 случая) приходится 70,4% от общей площади. Выявлено 16 ветровалов, вызванных явлениями неконвективной природы, но их общая площадь составляет 186,3 км<sup>2</sup> (14,4% от всей площади ветровалов в

регионе, что почти в три раза больше, чем на ЕТР). Все ветровалы, вызванные штормами неконвективной природы, наблюдались в горной местности – на восточных склонах Северного Урала, в Кузнецком Алатау, в Саянах и в Хамар-Дабане.

Таблица 3.6  
Распределение ветровалов в Сибири в зависимости от типов вызвавших их метеорологических явлений

Метеорологическое явление, вызвавшее ветровал	Степень достоверности определения	Количество ветровалов	Суммарная площадь, км <sup>2</sup>
Шквал	Высокая	280	747.1
	Средняя	12	165.07
Смерч	Высокая	273	170.9
	Средняя	76	20.80
Не конвективные явления	Высокая	16	186.3
	Средняя	0	0
Всего	Высокая	569	1104.3
	Средняя	88	185.9

Выявлено два случая крупных комбинированных ветровалов (когда могли наблюдаться одновременно смерч и шквал): 15.06.2020 г. в районе Нижнеудинска Иркутской области на площади 12,74 тыс. га и 01.07.2020 в южной части Кемеровской области на площади 2,97 тыс. га. Оба эти случая определены как шкваловые ветровалы со средней степенью достоверности.

Ветровалы в базе данных отнесены к 433 различным штормовым событиям. Из них с 337 событиями связан только один ветровал, с остальными 95 событиями – от двух до 19 ветровалов. На эти 95 событий приходится 59% от общей площади ветровалов, то есть доля от общей площади ветровалов, связанных со «вспышками» опасных явлений в Сибири существенно меньше, чем на ЕТР. В то же время, в Сибири отмечалось пять штормовых событий, с которыми были связаны 10 и более ветровалов (на ЕТР отмечено всего 4 таких события). Крупнейшие по количеству ветровалов штормовые события в Сибири отмечались 18.06.2015 г. (12 шкваловых и 5 смерчевых ветровалов), 23.06.2007 г. (14 ветровалов вызваны смерчами и три – шквалами, в том числе два смерча наблюдались на ЕТР), 14.06.2010 г. (4 смерчевых и 10 шкваловых

ветровалов), 17.07.2007 г. (7 смерчевых и три шкваловых ветровала) и 26.05.2020 г. (10 ветровалов, вызванных шквалами). Как и в аналогичных случаях на ЕТР, при таких масштабных вспышках ветровалы группируются в две-три хорошо различимые параллельные линии, находящиеся на существенном расстоянии друг от друга.

По суммарной площади ветровалов выделяются три штормовых события (с общей площадью ветровалов свыше 10 тыс. га) – шторм неконвективного характера в Кузнецком Алатау 08.11.2019 г., шквал в районе Нижнеудинска Иркутской области 15.06.2020 г. и вспышка разрушительных шквалов (деречо) в Иркутской области 16.07.2004 г.

### **Характеристики метеорологических явлений по данным метеостанций**

Метеостанции на территории Сибири распределены менее равномерно, чем на ЕТР. Так, в центральной части Красноярского края расстояние между ближайшими метеостанциями достигает 150-300 км, та же ситуация характерна для северной части ХМАО. На остальной территории плотность сети метеостанций сопоставима с аналогичными значениями в лесной зоне ЕТР. В результате доля ветровалов, для которых была получена информация о порывах ветра ( $\geq 15$  м/с) с ближайших метеостанций, составляет 16,6% для случаев со смерчами и 26% для прочих ветровалов, что несколько меньше, чем на ЕТР. В 50 случаях скорость порывов ветра составляла 20–24 м/с, в 20 случаях достигала критерия опасного явления ( $\geq 25$  м/с). Также в базу данных включено два события, когда скорость ветра достигала ураганных значений: 23.06.2007 г. на севере Свердловской области в Бурмантово при прохождении смерча на расстоянии менее 2 км от метеостанции отмечен порыв ветра 38 м/с, а также 16.07.2004 г. на метеостанции Хомутово в Иркутской области (33 м/с). С последним случаем связано три ветровала. Также ураганный шквал (34 м/с) был отмечен 23.07.2022 г. в Киренске, связанный с ним ветровал не включен в основную базу данных.

По аналогии с ЕТР рассмотрены случаи прохождения ветровалов в непосредственной близости от метеостанций (на расстоянии менее 10 км). Всего было выделено 16 таких случаев, из которых 11 вызваны шквалами, 3 – смерчами и 2 – сильным ветром неконвективного характера (табл. 3.7). В выборку включен также случай крупнейшего ветровала в Сибири 23.07.2022 г. в районе г. Киренск Иркутской области, когда одноименная метеостанция оказалась непосредственно в зоне сплошного ветровала. Измеренная скорость порывов ветра в перечисленных случаях составила от 14 м/с до 38 м/с (в шести случаях  $\geq 25$  м/с), что сопоставимо с аналогичными

## 102 Ветровалы в лесной зоне России и условия их возникновения

данными по ЕТР. Случаи прохождения смерчей непосредственно над метеостанциями в Сибири не зафиксированы (на ЕТР известен как минимум один такой случай).

Таблица 3.7  
Случаи ветровалов, наблюдавшиеся  
в непосредственной близости от метеостанций

Тип явления, вызвавшего ветровал	Дата	WMO ID метеостанции и расстояние до нее (км)	Порыв ветра и время (ВСВ), когда он наблюдался	Дополнительная информация о метеоявлениях	Площадь ветровала, га
Шквал	21.07.2002	23884 (4)	27 (12.00)	Сильный дождь 19 мм/12 ч	405
Смерч	23.06.2007	23827 (2)	38 (15.00)	–	392
Шквал	14.06.2010	28255 (10)	20 (12.00)	–	88
Шквал	11.06.2012	23632 (3)	22 (12.00)	–	175
Шквал	18.06.2015	23823 (3)	18 (18.00)	–	116
Шквал	03.06.2017	28240 (10)	26 (15.00)	–	363
Шквал	03.06.2017	28135 (10)	22 (15.00)	Крупный град до 40 мм	471
Шквал	18.06.2017	28368 (4)	24 (14.00)	–	46
Шквал	24.06.2017	29393 (6)	24 (18.00)	Сильный дождь 19 мм/12 ч	799
Смерч	19.06.2018	29231 (3)	19 (18.00)	Сильный дождь 22 мм/12 ч	19
Смерч	10.07.2019	28233 (5)	17 (15.00)	–	75
Штормовой ветер	09.11.2018	28036 (3)	25 (12.00)	–	808
Штормовой ветер	08.11.2019	29752 (9)	29 (15.00)	Сильный снегопад (27 мм/36 ч)	13157
Шквал	26.05.2020	29554 (8)	18 (12.00)	–	145
Шквал	26.05.2020	29566 (5)	14 (18.00)	Сильный дождь (29 мм/12 ч)	677
Шквал	23.07.2022	30230 (< 1)	34 (09.00)	Сильный дождь 29 мм/3 ч	24393

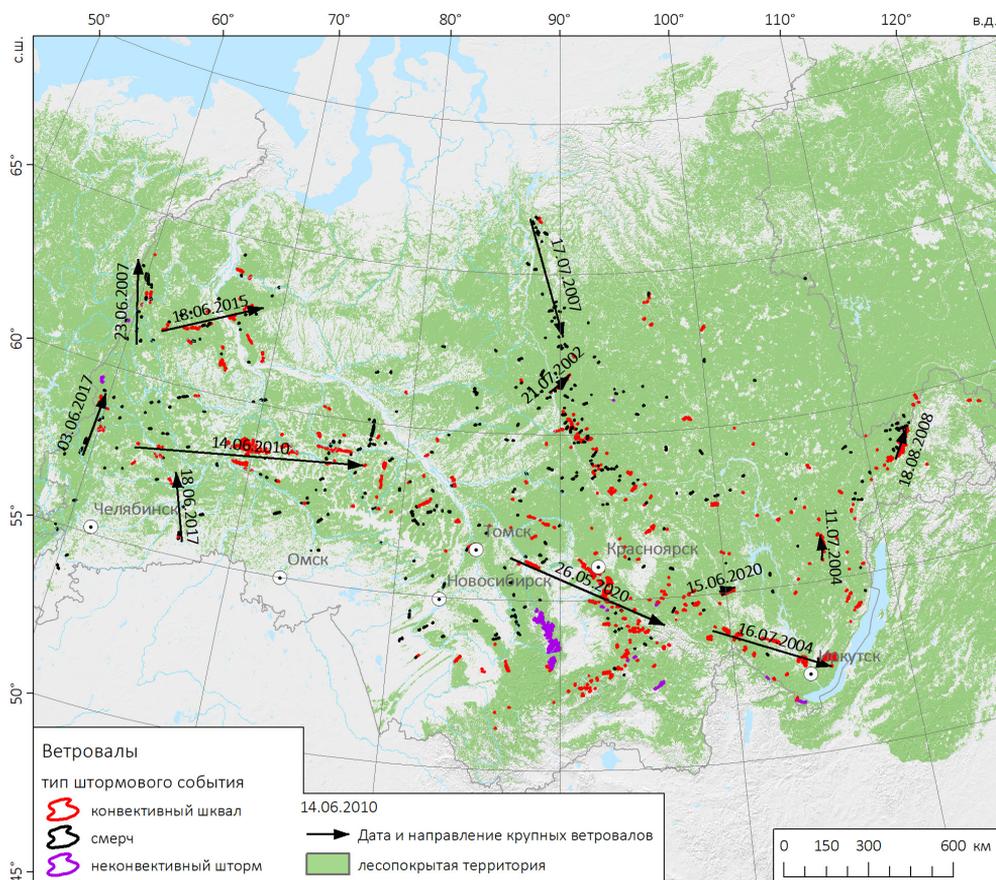
Серым выделены случаи, не включенные в основную базу данных.

### Пространственное распределение ветровалов в Западной и Центральной Сибири

Ветровалы выявлены на большей части лесной зоны Западной и Центральной Сибири, за исключением северных районов ХМАО (по причине небольшой доли лесопокрытой территории), а также восточной части Красноярского края и севера Иркутской области (по причине доминирования лиственных лесов, не подверженных ветровалу). Максимальная плотность ветровалов отмечается в районах преобладания темнохвойных лесов, а именно вдоль Енисейского кряжа (в центральной части Красноярского края), а также к югу от г. Красноярск (рис. 2.2, рис. 3.9).

Северная граница распространения ветровалов в Сибири неоднородна, в отличие от ЕТР. Так, в Западной Сибири самые северные ветровалы отмечались на 63–64° с.ш. (заметно южнее, чем на ЕТР), что обусловлено скорее не климатическими причинами, а сложностью обнаружения ветровалов на территории, где доля лесопокрытой территории не превышает 30% из-за сильной заболоченности. В то же время в Центральной Сибири наблюдалась крупнейшая вспышка шквалов и смерчей, вызвавших ветровалы вблизи Северного Полярного круга недалеко от г. Игарка 17.07.2007 г. Эти случаи смерчей считаются самыми северными в России (Chernokulsky et al., 2020a). Южная граница распространения ветровалов в Западной Сибири проходит по лесостепной зоне. Восточнее, в горах Алтая и Саян, также отмечается постепенное снижение повторяемости ветровалов по мере движения с севера на юг, обусловленное в частности снижением лесистости и сменой породного состава лесов (уменьшением доли темнохвойных пород).

Доля площади ветровалов от площади лесопокрытой территории в Сибири (0,042%) в среднем в 4,5 раза меньше, чем на ЕТР, если рассматривать аналогичный период 2001–2020 гг. Выделяется лишь несколько районов, где эта величина превышает 0,1% (рис. 3.10). Наиболее подвержены ветровалам темнохвойные и местами также сосновые леса в Южной и Центральной Сибири. Наибольшая доля площади ветровалов от общей площади лесов (0,5–1%) выявлена в западной, центральной и северо-восточной части Иркутской области, а также в горах Кузнецкого Алатау, где наблюдались катастрофические ветровалы, отмеченные на рис. 3.9. В целом наибольшей подверженностью ветровалам отличаются леса в горной и предгорной местности, где наблюдались крупные ветровалы, вызванные как шквалами (в 2004, 2008, 2020, 2022 гг.), но и штормами неконвективного характера (наиболее крупный ветровал отмечался в Кузнецком Алатау в ноябре 2019 г.).



**Рис. 3.9.** Пространственное распределение сплошных ветровалов в Западной и Центральной Сибири за 2001–2020 гг. Указаны даты крупнейших по площади ветровалов за рассматриваемый период.

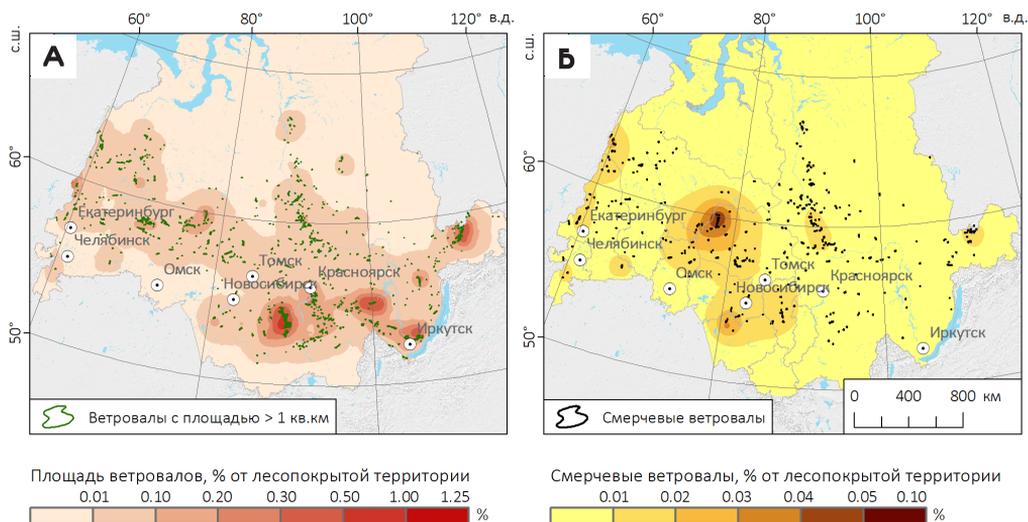
Лесистость оценена по Карте растительности России

(Барталев и др., 2011, 2016).

Наибольшее число случаев ветровалов, вызванных смерчами, наблюдается в Томской области и на Енисейском кряже (но в Томской области существенно больше их площадь). В этих регионах успешному выявлению смерчевых ветровалов способствует высокая доля лесопокрытой площади (80-90% и выше). Также крупные смерчевые ветровалы отмечались в Новосибирской области и Алтайском крае, где доля лесопокрытой площади составляет менее 50%, так что реальная повторяемость смерчей может быть существенно выше

полученных оценок по данным о ветровалах. Примечательно, что смерчи весьма редко наблюдаются в южной части Красноярского края и в Иркутской области (за исключением ее северо-восточной части, где крупные вспышки смерчей отмечались в 2002 и 2018 гг.). При этом крупные ветровалы, вызванные шквалами, на этой территории наблюдаются регулярно (в 2004, 2008, 2015, 2020 и 2022 гг.), а высокая лесистость территории способствует успешному выявлению ветровалов.

Таким образом, данная особенность пространственного распределения смерчей объективно существует и обусловлена атмосферной циркуляцией. Высокая повторяемость смерчей отмечается в тех регионах, над которыми проходят траектории юго-западных циклонов каспийского и аральского происхождения. С прохождением таких циклонов связаны наиболее резкие изменения погоды, а термобарическое поле характеризуется сильно развитой меридиональностью (Горбатенко и др., 2007).



**Рис. 3.10.** Отношение площади ветровалов к площади лесопокрытой территории в Западной и Центральной Сибири: для всех ветровалов (а) и для ветровалов, вызванных смерчами (б).

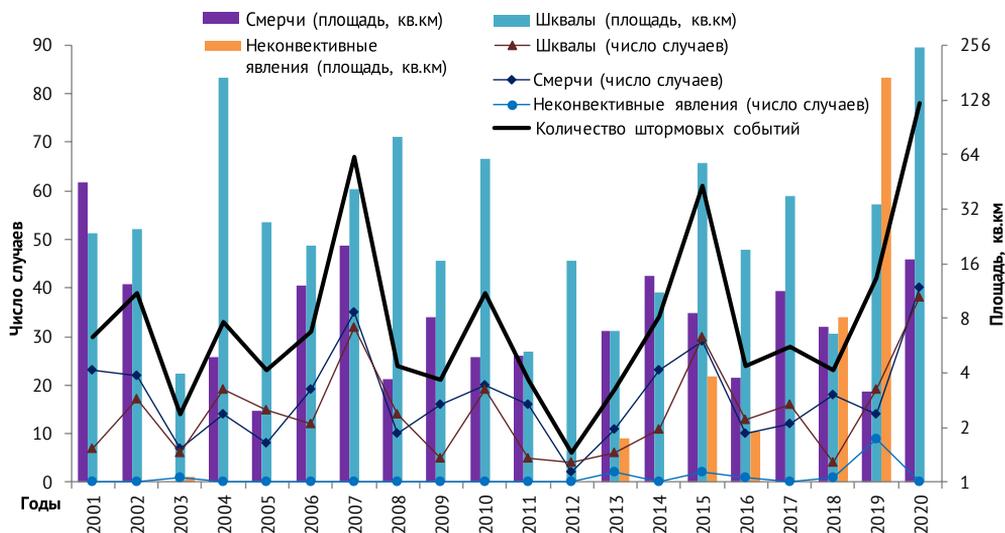
## Распределение ветровалов и штормовых событий во времени

### Межгодовая изменчивость

Из 657 ветровалов, выявленных в Западной и Центральной Сибири, год возникновения был успешно определен для всех событий, а месяц возникновения – для 67,5% из них, в том числе 67,3% смерчевых и 67,5% прочих ветровалов. Даты удалось точно определить для 43,2% ветровалов, включая 39,2% смерчевых и 47,7% прочих. На них приходится 74,9% от общей площади. Таким образом, доля ветровалов с известными датами в Сибири существенно меньше, чем на ЕТР. Из 16 крупнейших ветровалов с площадью более >1000 га в трех случаях дата события осталась неизвестной.

Как и на ЕТР, в Сибири отмечаются сильные межгодовые колебания по числу случаев и площади ветровалов и вызвавших их штормовых событий (рис. 3.11). Наибольшие площади ветровалов отмечены в 2004, 2019 и 2020 гг., когда наблюдались крупнейшие ветровалы, вызванные шквалами (16.07.2004, 15.06.2020) и штормами неконвективного характера (08.11.2019). По количеству штормовых событий хорошо выделяются максимумы в 2007, 2015 и 2020 гг. В эти годы также наблюдалось максимальное число случаев как шкваловых, так и смерчевых ветровалов. Особенно выделяется 2020 г., когда наблюдалось 78 ветровалов. В связи с этим, в 2020 г. отмечено наибольшее число случаев по территории России в целом (137 ветровалов).

Статистически значимой корреляции между числом штормовых событий на ЕТР и в Сибири не наблюдается. В 2003 г. число случаев ветровалов было невелико как на ЕТР, так и в Сибири, а 2004, 2007, 2010 и 2020 гг. наоборот, отличались высокой частотой возникновения ветровалов как в Сибири, так и на ЕТР. В то же время в отдельные годы эти показатели находились в противофазе. Так, в 2002 г. на ЕТР отмечался минимум повторяемости ветровалов, обусловленный блокирующим антициклоном в июле-августе, а в Сибири отмечено 39 штормовых событий, вызвавших ветровалы (максимум за период 2001-2006 гг.). Ярко выраженный минимум количества штормовых событий приходится на 2012 г., когда над Западной Сибирью в летний период господствовал блокирующий антициклон, с которым была связана засуха и масштабные лесные пожары (Барашкова и др., 2013). В то же время на ЕТР в 2012 г. наблюдалось множество крупных ветровалов, связанных с меридиональными процессами на периферии данного антициклона (Калинин и др., 2021).

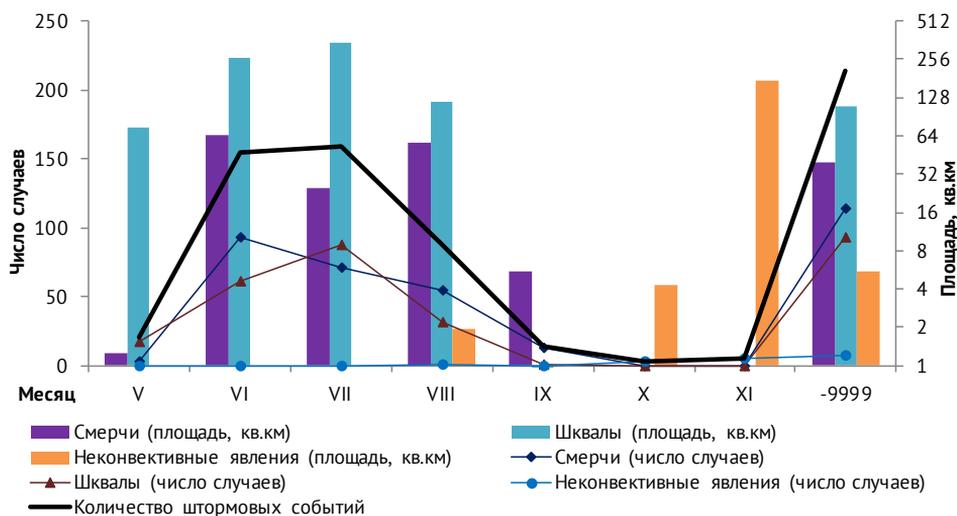


**Рис. 3.11.** Межгодовая изменчивость количества ветровалов, вызванных разными метеорологическими явлениями, и их площади в Западной и Центральной Сибири в 1986-2020 гг.

### Внутригодовое распределение

Как и на ЕТР, период возникновения шкваловых и смерчевых ветровалов в Сибири соответствует сезону развития конвективных явлений (с мая по сентябрь), тогда как ветровалы, вызванные штормами неконвективного характера, наблюдались чаще в октябре – ноябре (рис. 3.12). Даты самых ранних и поздних случаев ветровалов на ЕТР и в Сибири очень близки. Так, смерчевые ветровалы в Сибири наблюдались с 10 мая по 20 сентября (на ЕТР – с 12 мая по 22 сентября), а шкваловые – с 22 мая по 26 сентября (на ЕТР – с 12 мая по 18 сентября). Эта оценка может быть неточной, так как у 57% ветровалов даты остались неизвестными.

Внутригодовое распределение случаев ветровалов в Сибири и на ЕТР также очень похоже: наибольшая повторяемость смерчей наблюдается в июне, шквалов – в июле общая площадь ветровалов также достигает максимума в июле. Шквалы и смерчи, вызвавшие наиболее крупные ветровалы ( $S > 10 \text{ км}^2$ ) наблюдались между 26 мая и 18 августа.



**Рис. 3.12.** Внутригодовое распределение количества ветровалов в Западной и Центральной Сибири, вызванных различными метеорологическими явлениями, и их площади (2001-2020 гг.)

Как и на ЕТР, в Сибири выявлен ряд крупных вспышек шквалов и смерчей, когда за сутки наблюдалось свыше 10 ветровалов, связанных с одним или несколькими штормовыми событиями (табл. 3.8). В случае 23.06.2007 г. два ветровала, связанных с данной вспышкой, наблюдались на ЕТР (на востоке Республике Коми), они также учтены в таблице. Также среди перечисленных случаев представляет интерес вспышка смерчей и шквалов 17.07.2007 (самый северный подобный случай на территории России) и 25-26.05.2020 г. – вспышка, продолжавшаяся двое суток в полосе протяженностью свыше 2 тыс. км (от Свердловской области до юго-востока Красноярского края).

### Суточный ход

Данные о времени возникновения ветровалов в Сибири существенно менее полные, чем на ЕТР, поскольку спутниковые снимки Meteosat-8 (основной источник данных о времени прохождения МКС через область, где наблюдался ветровал) доступны лишь к западу от 80° в.д. Поэтому основным источником данных о времени возникновения ветровалов были наблюдения метеостанций. Всего удалось определить время с точностью 3 ч для 171 ветровала (26%). Свыше 70% из них наблюдались в период между 12.00 и 18.00 по ВСВ (с 17.00 и до полуночи по местному времени). Самый необычный

по времени возникновения ветровал отмечался ранним утром (около 05.00 по местному времени) 26.05.2020 вблизи метеостанции Новый Васюган, где также был отмечен шквал 25 м/с. Подобные случаи сильных шквалов в период суточного минимума развития конвекции в Сибири, как и на ЕТР, исключительно редки и представляют большой интерес. Для их формирования необходимы экстремальные условия в атмосфере – сочетание сильной неустойчивости, высокого влагосодержания воздуха, динамического фактора и сдвига ветра (что подробнее показано в Главе 4).

Таблица 3.8

Крупнейшие по числу случаев вспышки шквалов и смерчей, вызвавшие ветровалы в Западной и Центральной Сибири в 2001–2020 гг.

Дата	Число ветровалов и штормовых событий	Распределение ветровалов по типам	Общая площадь, км <sup>2</sup>	Субъекты РФ	Сведения о зафиксированных метеорологических явлениях на станциях
23.06.2007	22/2	шквалы (6) смерчи (16)	22.71	Свердловская обл., Ханты-Мансийский АО, респ. Коми	Порыв ветра до 38 м/с (периферия смерча)
17.07.2007	13/2	шквалы (3) смерчи (10)	7.29	Красноярский край	Шквалы до 23 м/с, ливневые дожди
14.06.2010	16/2	шквалы (10) смерчи (6)	47.40	Свердловская, Тюменская обл., Ханты-Мансийский АО,	Шквалы до 24 м/с, ливневые дожди
18.06.2015	19/1	шквалы (7) смерчи (12)	15.09	Ханты-Мансийский АО, Свердловская обл.	Шквалы до 23 м/с, ливневые дожди
25- 26.05.2020	16/4	шквалы (15) смерчи (1)	65.77	Свердловская Тюменская, Томская, Кемеровская обл., Красноярский край	Шквалы 25-30 м/с, ливневые дожди (до 30 мм/12 ч)

### Геометрические характеристики ветровалов

Как и на ЕТР, в Западной и Центральной Сибири большая часть площади повреждения лесного покрова связана с небольшим числом крупных (катастрофических) ветровалов (рис. 3.13 а). Так, на 10 крупнейших ветровалов в Сибири приходится 44,7% от общей площади всех ветровалов (на ЕТР – 45%), а на 10 крупнейших штормовых событий – 53% от общей площади (на ЕТР 56%). Сведения о крупнейших ветровалах приведены в табл. 3.9, в нее также включен случай 23.07.2022 г. в районе г. Киренск Иркутской области (не включен в основную базу данных, но является крупнейшим известным ветровалом в Сибири). Большинство крупнейших ветровалов в Сибири, как и на ЕТР, были вызваны шквалами. Также в Сибири зафиксирован крупнейший из известных в России смерчевых ветровалов (в августе 2001 г. в Томской области, на площади 3150 га). При этом в среднем площади смерчевых ветровалов в Сибири существенно меньше, чем на ЕТР (рис. 3.13 а)

Важно отметить, что выборки ветровалов по ЕТР (за 2001-2020 гг.) и Сибири нельзя отнести к одной генеральной совокупности по геометрическим признакам, несмотря на то, что они были сформированы на основе одной и той же методики. Согласно тесту K-S, при сравнении этих двух выборок ветровалов, вызванных смерчами, выявлены статистически значимые различия по всем геометрическим характеристикам (табл. 3.10). Смерчевые ветровалы в Сибири имеют статистически значимо меньшую площадь, длину и ширину в сравнении со смерчевыми ветровалами на ЕТР. Эти различия могут быть обусловлены как объективными причинами (более благоприятными условиями для возникновения смерчей, вызывающих крупные ветровалы на ЕТР в сравнении с Сибирью), так и ограничениями методики сбора данных, описанными в п. 2.4. В частности, более успешное выявление смерчевых ветровалов в Сибири может быть связано с тем, что здесь существенно реже проводятся работы по расчистке ветровалов (санитарные рубки), которые не позволяют определить причину его возникновения. Для ветровалов, вызванных шквалами, статистически значимы различия по длине и ширине, а различия по площади не значимы.

Таблица 3.9  
Штормовые события, крупнейшие  
по общей площади ветровалов в Сибири

Дата	Общая площадь ветровалов км <sup>2</sup>	Распределение ветровалов по типам	Длина и макс. ширина трека, км	Субъекты РФ	Сведения о зафиксированных метеорологических явлениях на станциях
Август 2001	34,56	смерчи (3)	94,2/1,58	Томская обл.	Не зафиксирован
16.07.2004	110,81	шквалы (7)	447,2/21,4	Иркутская обл.	Шквалы до 33 м/с
11.07.2004	46,63	шквалы (2)	89,8/5,97	Иркутская обл.	Не зафиксирован
18.08.2008	67,65	шквал (1)	106,6/14,2	Иркутская обл.	Шквал 44 м/с
14.06.2010	46,78	769,5/53,5	769,5/53,3	Свердловская, Тюменская обл, Ханты-Мансийский АО	Шквалы до 24 м/с
08.11.2019	166,4	штормовой ветер (4)		Кемеровская обл., Хакасия	Ветер до 29 м/с, сильный снегопад (до 15 мм/12 ч)
26.05.2020	41,12	шквал (10)	333,3/18,4	Кемеровская обл, Красноярский край	Шквалы до 28 м/с, ливневые дожди до 30 мм/12 ч
15.06.2020	127,45	шквал (1)	56,9/7,4	Иркутская обл.	Не зафиксирован
23.07.2022	243,9	шквал (1)	182,6/xxxx	Иркутская обл.	Шквал 34 м/с, ливневый дождь 29 мм

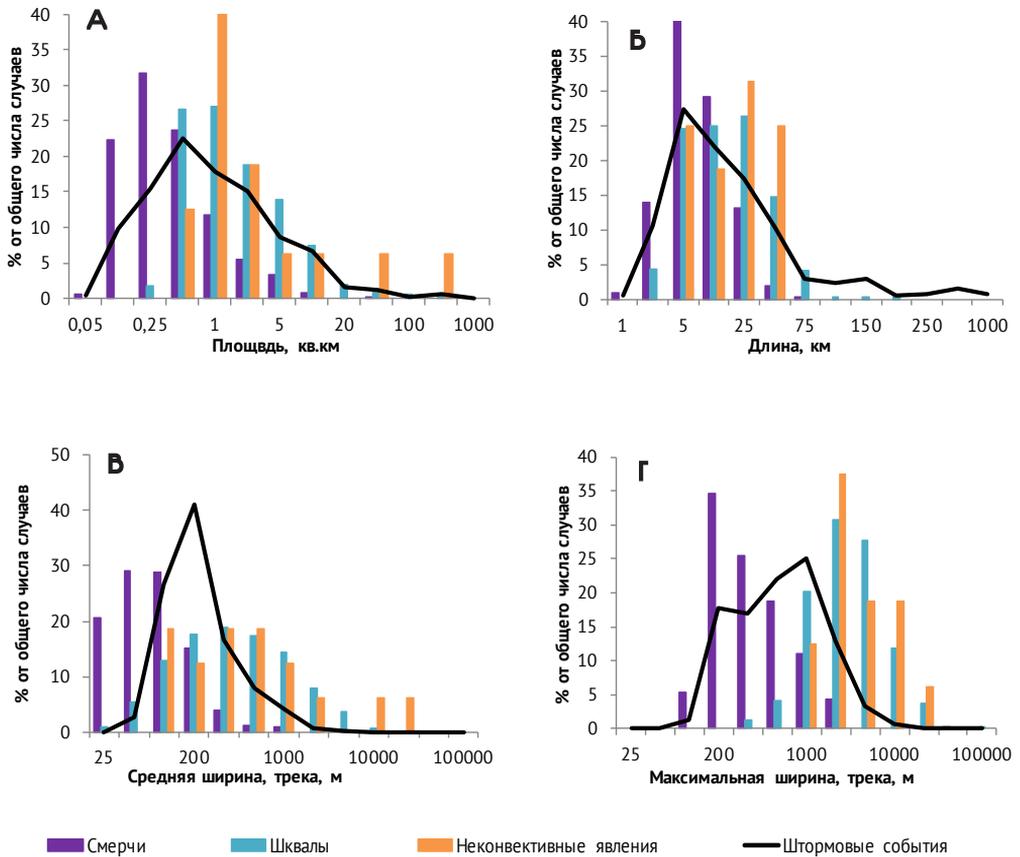
Таблица 3.10

Медианные значения геометрических характеристик ветровалов на ЕТР и в Сибири. Выделены статистически значимые различия по критерию К-S

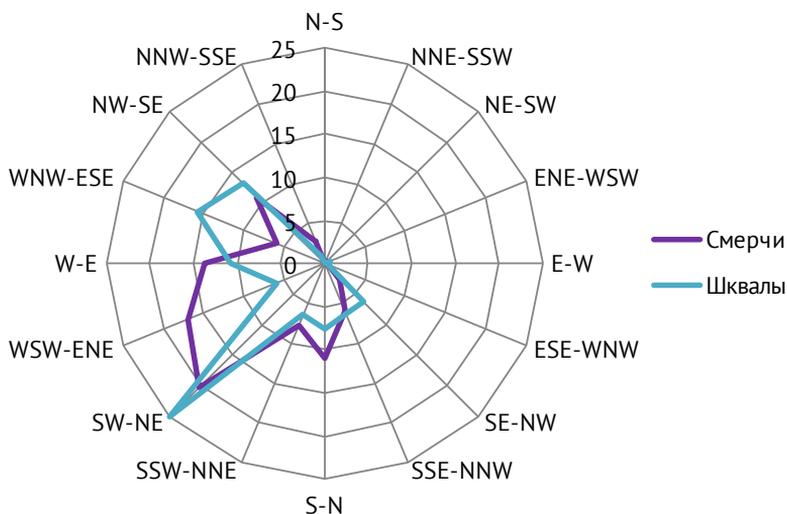
Выборка	Площадь, га	Длина, км	Ширина с учетом разрывов, м		Ширина без учета разрывов, м	
			средняя	максимальная	средняя	максимальная
Смерчи (ЕТР/Сибирь)	29,4/21,1	5,3/4,5	104/95	257/226	103/50	274/228
Шквалы (ЕТР/Сибирь)	105,1/86,4	12,3/9,1	168/190	588/634	436/274	2136/1697

Длина отдельных ветровалов за 2001-2020 гг., включенных в базу данных, составляет от 0,8 км до 151,6 км (максимальное значение также принадлежит ветровалу 23.07.2022 г., см. табл. 3.9). Таким образом, максимальная протяженность ветровала в Сибири существенно меньше, чем на ЕТР. Протяженность треков штормовых событий в 4-х случаях (16.07.2004, 14.06.2010, 25.05.2020, 26.05.2020) превышала 400 км (рис. 3.13 б), причем первый случай соответствует критериям деречо не только по длине полосы разрушений, но и по зафиксированной скорости ветра на метеостанциях (Johns, Hirt, 1987).

Распределение ветровалов по направлению в Сибири существенно отличается от такового на ЕТР. Если на ЕТР доля случаев, которые перемещались с юго-западного квадранта, составляет 76% для смерчей и 66% для шквалов, то в Сибири аналогичный показатель составляет 70% для смерчей и 56% для шквалов (рис. 3.14). Значительно выше доля случаев, которые перемещались с северо-запада, к их числу относятся и наиболее разрушительные шквалы 16.07.2004 и 26.05.2020 г., приведенные в табл. 3.9. Также в отличие от ЕТР, ряд случаев смерчей, в том числе сильных, перемещались с севера или с северо-северо-запада (наиболее значительная вспышка смерчей с таким направлением движения отмечалась 07.06.2020 г.). Выявленные различия обусловлены особенностями атмосферной циркуляции над Сибирью, и требуют более детального изучения синоптических ситуаций, при которых формируются сильные шквалы и смерчи.



**Рис. 3.13.** Распределение геометрических характеристик ветровалов и треков штормовых событий в Западной и Центральной Сибири: площадь (а), длина (б), средняя и максимальная ширина без исключения разрывов (в, г).



**Рис. 3.14.** Распределение ветровалов по направлениям движения. Ветровалы, вызванные явлениями неконвективной природы, исключены по причине малого объема выборки.

### 3.3. Выдающиеся штормовые события, вызвавшие ветровалы в лесной зоне ЕТР и Сибири

#### Деречо и близкие по характеристикам штормовые события

Как показано в предыдущих разделах, значительная часть ущерба для лесного покрова от ветровалов (на ЕТР – свыше 50%) связана с сильными шквалами, охватывающими обширную территорию. Наиболее разрушительными из них являются так называемые деречо – долгоживущие шквалы, оставляющие полосы разрушений протяженностью свыше 400 км (Johns, Hirt, 1987). К настоящему времени в России было подтверждено всего два случая деречо, которые наблюдались 27.06.2010 и 29.07.2010 г. в центральной и в северо-западной части ЕТР (Chernokulsky et al., 2021). Площадь вызванных ими ветровалов в сумме достигает 1130 км<sup>2</sup>, или почти 36% от всей площади ветровалов, известных в лесной зоне ЕТР. В то же время, например в Германии в XXI в. отмечено 40 случаев деречо (Gatzen et al., 2020), в Европе в целом отмечается несколько случаев в год (Taszarek et al., 2019), а в США ежегодно

регистрируется 10-15 случаев деречо (Ashley, Mote, 2005).

Для того, чтобы классифицировать событие как деречо, помимо протяженности полосы разрушений, необходимо учесть скорость ветра. Порывы ветра в полосе протяженностью не менее 400 км должны достигать 26 м/с, а также должны быть зафиксированы ураганные порывы ветра ( $\geq 33$  м/с) в трех точках, каждая из которых должна быть удалена от ближайшей точки как минимум на 64 км (Johns, Hirt, 1987). Учитывая низкую плотность сети метеостанций, зафиксировать такие скорости ветра не всегда возможно, поэтому часто применяется косвенная оценка на основе анализа разрушений. В США для этого используется усовершенствованная шкала Фуджита (Wind Science..., 2006). Согласно данной шкале, наличие обширных и протяженных участков сплошного ветровала в лесных массивах, даже состоящих из пород деревьев с мягкой древесиной (к которым относятся все основные лесообразующие породы в лесной зоне России) может быть использовано как критерий ущерба, соответствующего скорости ветра 33 м/с или выше (F1 damage). Таким образом, спутниковые данные о ветровалах могут быть использованы для выявления случаев долгоживущих шквалов, соответствующих критериям деречо, как по протяженности полосы разрушений, так и по косвенным признакам интенсивности.

На основе полученных данных о ветровалах в лесной зоне России были выявлены 15 штормовых событий, близких по своим характеристикам к деречо (рис. 3.15). Во всех этих случаях протяженность полосы ветровалов, связанных с прохождением одной МКС, превышала 300 км. Исключением является случай 18.07.2012 г., когда при меньшей протяженности полосы ветровалов были также зафиксированы порывы ветра до 28 м/с и значительные разрушения за ее пределами. Во всех случаях основной ущерб был связан со шквалами, хотя в семи случаях также наблюдались смерчи, в том числе в случае 18.06.2015 г. выявлено 11 смерчей. Из рассматриваемых случаев 10 наблюдались на ЕТР, 4 – в Сибири и 1 – с переходом из ЕТР в Сибирь. Два случая на ЕТР (27.06.2010 и 29.07.2010) ранее были классифицированы как деречо. Еще два события (14.06.2010 в Западной Сибири и 16.07.2004 в Иркутской области) могут быть классифицированы как деречо по совокупности признаков. В этих случаях протяженность полосы ветровалов превышала 400 км, скорость ветра на метеостанциях достигала 33 м/с, а также наблюдался масштабный ущерб для населенных пунктов и инфраструктуры, характерный для ветров ураганной силы (табл. 3.11). Остальные случаи рассматриваются как близкие по характеристикам к деречо, но не соответствующие всем критериям этого явления.

С выделенными штормовыми событиями связано 129 ветровалов (102 из них вызваны шквалами, 27 – смерчами) на общей площади 1885,5 км<sup>2</sup>, что составляет 42,3% от всей площади ветровалов в лесной зоне ЕТР и Сибири. В 13 случаях был зафиксирован значительный материальный ущерб в населенных пунктах (наиболее масштабный ущерб связан с событием 16.07.2004 г.). Также в шести случаях шквалы привели к гибели людей, в том числе в двух случаях число жертв было значительным (29.07.2010 – 18 погибших и неустановленное число пострадавших, 16.07.2004 – 6 погибших и 58 пострадавших). Приведенные данные об ущербе (табл. 3.11) в совокупности с оценками повреждений лесного покрова показывают, что долгоживущие шквалы (деречо и близкие по характеристикам события) являются одними из наиболее опасных метеорологических явлений, характерных для территории России.

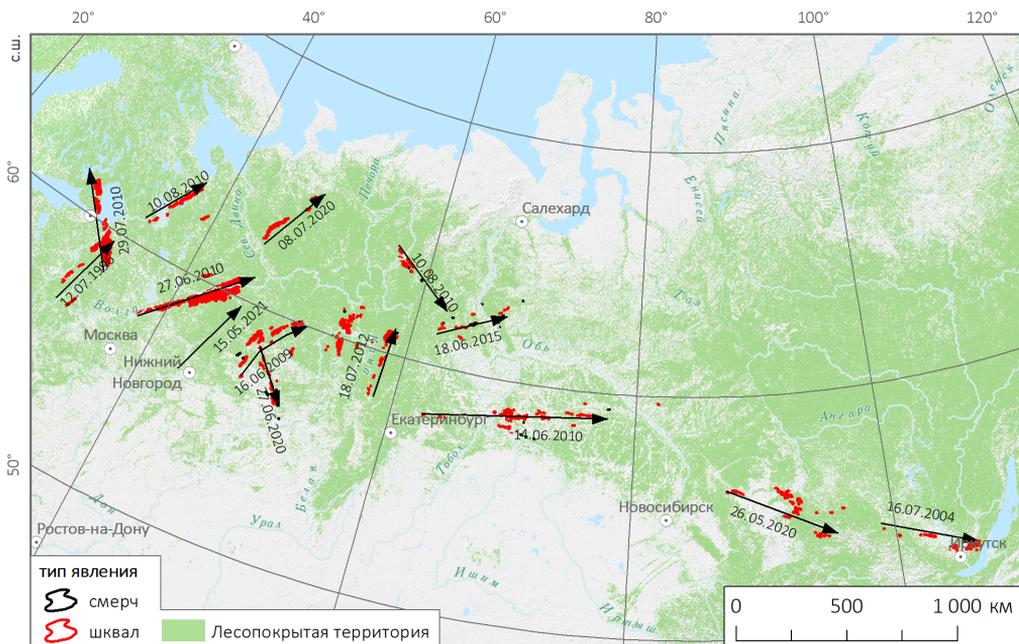


Рис. 3.15. Случаи деречо и близких к ним по характеристикам штормовых событий, выявленные по данным о ветровалах.

Таблица 3.11  
Штормовые события, близкие по характеристикам к дереву (1986-2021 гг.)

Дата, время (ВСВ)	Длины полосы ветров, км	Площадь ветров, км <sup>2</sup>	Явления погоды на метеостанциях	Характеристика ущерба	Ссылка на дополнительные материалы
12.07.1996, 15.00 – 21.00	339,6	85,32	Шквал 28 м/с (МС* Тихвин)	Нет данных	-
16.07.2004, 09.00 – 12.00	447,2	110,81	Шквал 27-33 м/с (МС Хомутово Иркутск)	Погибли 6 чел, пострадали 58 чел, значительные разрушения в городах Иркутск, Ангарск и Усолье-Сибирское, ущерб более 1 млрд. руб.	Ураган..., 2004
16.06.2009 12.00 – 17.00	350,1	130,87	Шквал 28-30 м/с (МС Шабалино, Мураши), сильный ливень 51 мм (МС Даровское), град 29 мм (МС Опарино)	Погибли 2 человека, 1 травмирован, значительные разрушения в нескольких районах Кировской области	
14.06.2010 10.00 – 17.00	769,5	47,40	Шквал до 33 м/с (МС Курган), на МС Тавда и Тобольск 29-33 м/с по шкале Бофорта	Значительные разрушения в Свердловской и в Тюменской областях, в Тобольске ущерб более 50 млн. руб., 20 человек получили травмы	Тобольску нанесен многомиллионный ущерб, ..., 2010
27.06.2010 08.00 – 14.30	544,6	502,3	Шквал 25-32 м/с (МС Тугаев, Ньюсенцица, Кашин, Данилов), крупный град, крупный град	Значительные разрушения в нескольких районах Ярославской и Вологодской областей, травмированы 19 чел., погибших нет	Chernokulsky et al., 2022

Дата, время (ВСВ)	Длины полосы ветровалов, км	Площадь ветровалов, км <sup>2</sup>	Явления погоды на метеостанциях	Характеристика ущерба	Ссылка на дополнительные материалы
29.07.2010 16.30 – 23.00	622**	755.48**	Шквалы до 29-30 м/с (МС Сосново, МС Рантасалми, пост Запорожское)	Значительные разрушения в Приозерском районе Ленинградской области и в Любытинском районе Новгородской области. Погибли 18 человек	Chernokulsky et al., 2022
10.08.2010 03.45 – 07.15	305,1	29,26	Шквал 20 м/с (МС Пудож)	Шквал прошел в малонаселенной местности, нет данных об ущербе	–
10.08.2010 13.45 – 18.00	495,8	20,45	Нет данных	В г. Вуктыл повреждены кровли домов, ущерб 10,3 млн. руб.	Ущерб от урагана..., 2010
18.07.2012 08.00 – 15.00	256,5	94,51	Шквалы до 28 м/с (МС Оса), сильный ливень (36 мм/20 мин) на МС Чердынь, град до 18 мм	Ущерб в нескольких районах западной части Пермского края, в Кудымкарском районе повреждены 150 жилых домов, получили травмы 6 человек	Chernokulsky et al., 2021
18.07.2012 10.00 – 15.00	308,9	101,83	Шквалы до 25 м/с (МС Североуральск)	Ущерб в нескольких районах восточной части Пермского края: в г. Лысьва погиб 1 чел, повреждено 50 домов, в пос. Суксун повреждено 180 домов	Chernokulsky et al., 2021
18.06.2015 12.00 – 18.00	406,09	15,09	Шквалы до 23 м/с (МС Атымья)	В муниципалитетах Ханты-Мансийского АО ущерб составил 27,5 млн. руб.	(Шихов и др., 2022)

Дата, время (ВСВ)	Длины полосы ветров, км	Площадь ветров, км <sup>2</sup>	Явления погоды на метеостанциях	Характеристика ущерба	Ссылка на дополнительные материалы
26.05.2020 10.30 – 16.00	517,3	64,60	Шквалы 25-32 м/с (МС Шира, Мариинск, Кемчуг)	Погибли 2 человека, 1 травмирован, повреждены или разрушены кровли 120 частных, 11 многоквартирных домов и 16 социальных объектов	Гочаков и др., 2021
27.06.2020 10.00 – 15.30	354,7	19,92	Шквалы 24-25 м/с (МС Котельнич, Вятские Поляны), град до 40 мм	Значительный ущерб в нескольких районах Кировской области и Татарстана, данных о пострадавших нет	(Шихов, Ажигов, 2020)
08.07.2020 13.30 – 17.30	313,2	57,11	Шквал 33 м/с (МС Сура)	В Пинежском районе повреждено около 100 домов, данных о пострадавших нет	(Шихов, 2020)
15.05.2021 12.00 – 17.30	366,6	155,5	Шквалы 30-31 м/с (МС Николо-Полома, Мантурово)	В Костромской области погиб 1 чел, пострадали 10 чел., повреждены около 300 жилых домов и социальные объекты. В Ивановской области повреждены 65 многоквартирных домов, ущерб 54 млн. руб.	Чернокульский и др., 2022a

\*МС – метеостанция

\*\* с учетом данных по территории Финляндии

### Крупнейшие вспышки смерчей, выявленные по данным о ветровалах

Помимо сильных долгоживущих шквалов, крупные ветровалы в лесной зоне России могут быть связаны со вспышками смерчей (хотя по площади они приблизительно в 10 раз меньше крупнейших шкваловых ветровалов). Под вспышками смерчей ('tornado outbreaks') понимают случаи формирования нескольких смерчей в пределах одной системы мезо- или синоптического масштаба (Чернокульский и др., 2021). В ряде случаев они также сопровождаются сильными шквалами, вызывающими ветровалы. Наиболее известным случаем вспышки смерчей на территории России была так называемая Ивановская вспышка 09.06.1984 г., в ходе которой было зафиксировано 11 смерчей (включая смерч с интенсивностью F4 в районе р. Иваново, который вызвал наибольшие разрушения). Из этих 11 смерчей не менее 8 вызвали ветровалы (Chernokulsky, Shikhov, 2018).

В работе (Чернокульский и др., 2021) были опубликованы данные о 37 вспышках с пятью и более смерчами. Значительная часть данных об этих вспышках была получена на основе анализа спутниковых снимков ветровалов. На основе снимков высокого пространственного разрешения с открытых картографических сервисов и снимков Sentinel-2 возможно оценить геометрические характеристики всех смерчей с интенсивностью  $\geq F1$  по шкале Фуджита, в том числе разделять треки разных смерчей, наблюдавшихся на небольшом расстоянии друг от друга (Чернокульский и др., 2021). В результате за последние годы сформировался систематический сдвиг информации о вспышках смерчей в пользу регионов с наибольшей лесистостью территории.

В табл. 3.12. приведена информация о крупнейших вспышках смерчей в России на основе ранее опубликованных данных (Чернокульский и др., 2021), актуализированная по данным о ветровалах за последующие годы. Указано как общее количество смерчей согласно ранее опубликованной оценке, так и количество значительных ( $\geq 5$  га) смерчевых ветровалов.

Важно отметить, что далеко не все вспышки, которые включали большое количество смерчей, отличались также их высокой интенсивностью. Некоторые разрушительные смерчи с интенсивностью F3 по шкале Фуджита были одиночными, как например, случай 29.08.2014 г. в Башкортостане (Chernokulsky et al., 2015). Методика оценки интенсивности смерчей рассматривается в работах (Shikhov, Chernokulsky, 2018; Chernokulsky et al., 20206).

По совокупности характеристик (количество смерчей, их максимальная и средняя интенсивности) наиболее значимыми являются вспышки смерчей

23.06.2007 г., 07.06.2009 г., 12.06.2010 г., 18.06.2015 г., 17–18.06.2017 г., 02.08.2017 г. и 02.08.2021 г. (рис. 3.16). Условия их возникновения обсуждаются в ряде публикаций (Шихов, Быков, 2015; Chernokulsky et al., 2020б, Шихов и др., 2020; Калинин и др., 2021б). Наибольшие площади ветровалов, вызванных смерчами, связаны со вспышками 09.06.1984 (36,5 км<sup>2</sup>) и 07.06.2009 (32,8 км<sup>2</sup>).

Таблица 3.12

Крупнейшие вспышки смерчей в России, выявленные или уточненные на основе данных о ветровалах

Дата / диапазон дат	Количество смерчей и смерчевых ветровалов*	Макс. интенсивность по шкале Фуджита	Средняя интенсивность**	Субъекты РФ
09.06.1984	11/8	4	2,0	Ивановская, Кировская, Костромская, Московская, Нижегородская, Тверская, Ярославская области
24.07.1988	5/5	2	1,8	Республика Коми
Август - сентябрь 2002	6/6	1	1,0	Иркутская область, респ. Саха (Якутия)
23.06.2007	13/13	2	1,2	Свердловская область, Республика Коми, Ханты-Мансийский авт. округ
07.06.2009	28/18	2	1,5	Республика Коми, Пермский край
12.06.2010	12/9	3	1,5	Костромская, Нижегородская и Ярославская области
24.05.2013	7/5	2	1,5	Смоленская, Московская области
12.07.2014	6/6	2	1,3	Томская и Тюменская области, Ханты-Мансийский авт. округ

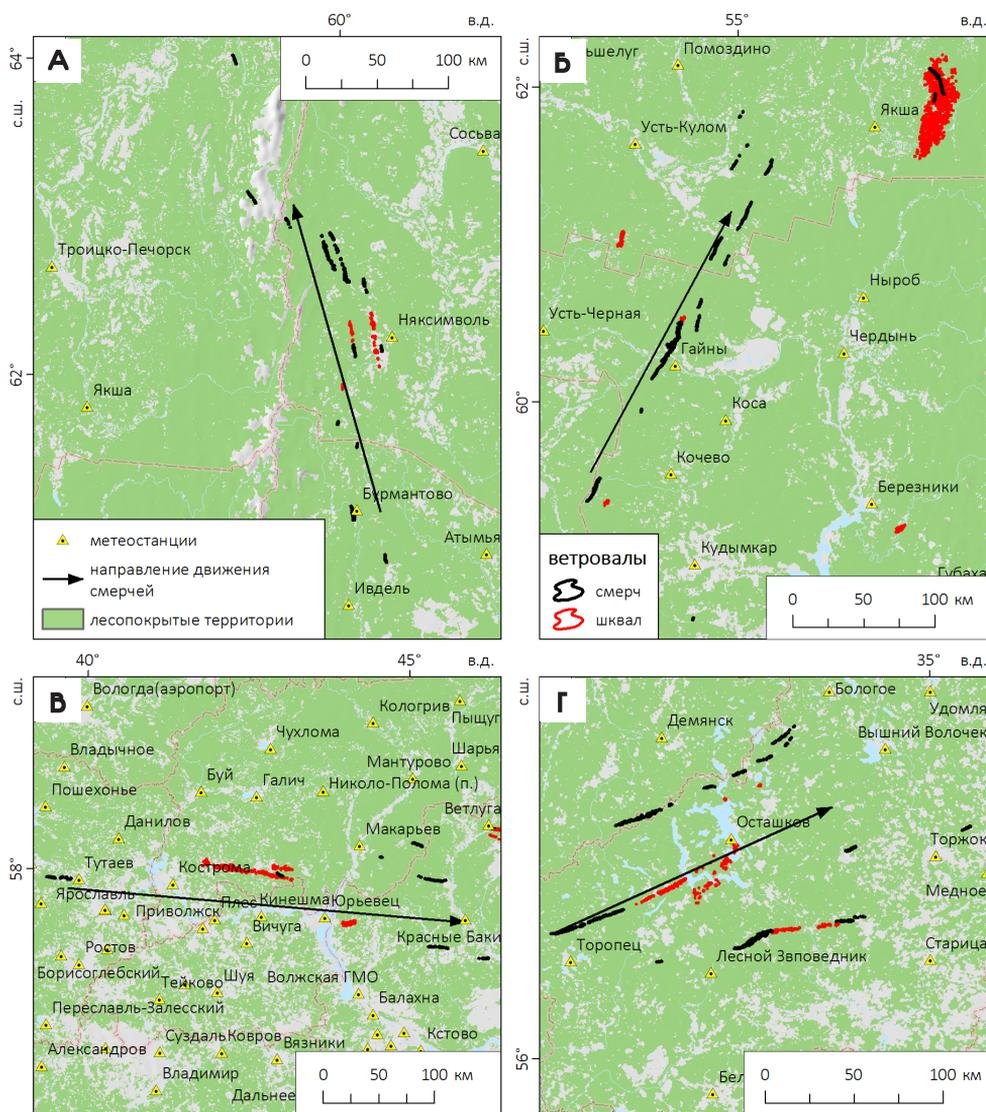
Дата / диапазон дат	Количество смерчей и смерчевых ветровалов*	Макс. интенсивность по шкале Фуджита	Средняя интенсивность**	Субъекты РФ
29.07.2014	5/5	2	1,2	Амурская область, Хабаровский край
29.05.2017	14/3	2	1,4	Владимирская, Калужская, Московская, Нижегородская и Смоленская области
03.06.2017	28/3	2	0,9	Свердловская области, Пермский край, республика Башкортостан
9–10.06.2017	14/2	2	1,3	Новосибирская, Омская и Томская области, Красноярский край
17–18.06.2017	13/2	4	1,1	Курганская, Свердловская и Тюменская области, республика Башкортостан
30.07.2017	26/8	1	1,0	Архангельская область, респ. Марий-Эл
02.08.2017	56/15	2	1,2	Московская, Новгородская, Псковская, Смоленская и Тверская области
04.06.2018	8/4	2	1,1	Кировская область, респ. Удмуртия
19.06.2018	8/3	3	1,4	Новосибирская обл., Алтайский край
21.08.2018	7/2	2	1,1	Вологодская, Кировская и Костромская обл.
13.09.2018	8/6	2	1,4	Пермский край, респ.Коми

Дата / диапазон дат	Количество смерчей и смерчевых ветровалов*	Макс. интенсивность по шкале Фуджита	Средняя интенсивность**	Субъекты РФ
07.06.2020	5/5	2	Нет данных	Кемеровская область
27.06.2020	8/4	2	Нет данных	Кировская область, респ. Удмуртия, Татарстан
15.05.2021	7/5	2	Нет данных	Ярославская, Нижегородская, Костромская, Вологодская области
08.07.2020	7/7	Нет данных	Нет данных	Красноярский край
8-9.07.2020	6/4	2	Нет данных	Владимирская, Архангельская, Тульская, Костромская области
02.08.2021	9/9	3	Нет данных	Тверская область

*Примечание:*

\*Общее количество смерчей приведено по данным (Чернокульский и др., 2021), а количество смерчевых ветровалов – на основе авторской базы данных, причем учитываются только ветровалы, превышающие минимальный порог площади ( $\geq 5$  га).

\*\* Средняя интенсивность указана в соответствии с опубликованной оценкой (Чернокульский и др., 2021)



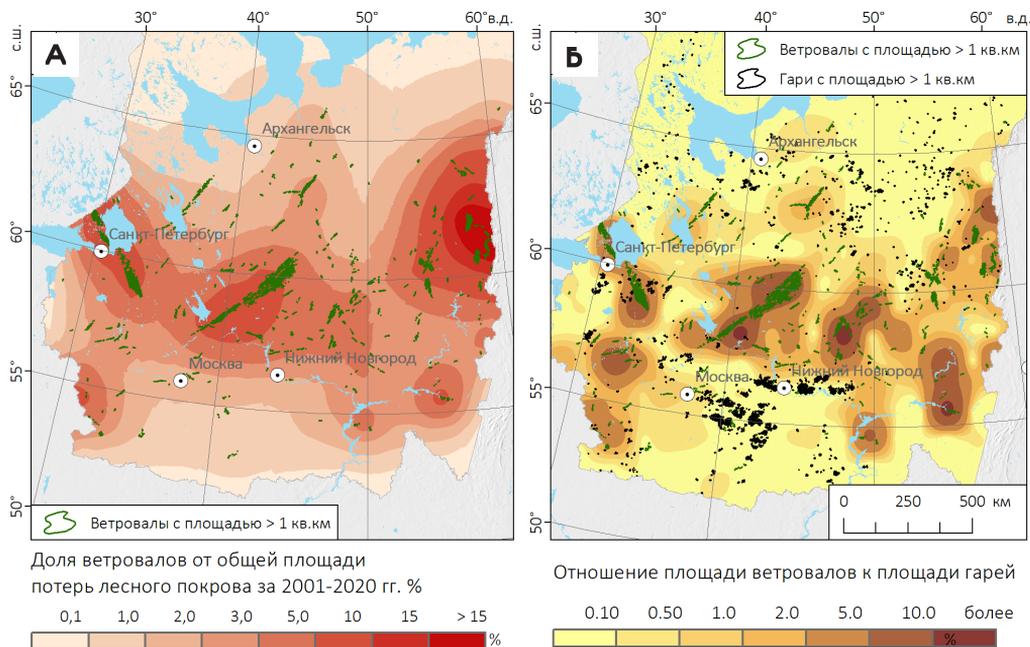
**Рис. 3.16.** Крупнейшие вспышки смерчей в России в 2001–2020 гг., выявленные на основе данных о ветровалах: 23.06.2007 (а), 07.06.2009 (б), 12.06.2010 (в), 02.08.2017 (г). Показаны только крупные ветровалы, включенные в базу данных

### 3.4. Значимость ветровалов как фактора нарушения лесного покрова

До недавнего времени оценки значимости ветровалов как фактора нарушений лесного покрова в России имели приближенный характер или вовсе отсутствовали, за исключением отдельных регионов, таких как Костромская область (Петухов, Немчинова, 2014) или Средний Урал (Lässig, Močalov, 2000). Доля ветровалов от общей площади потерь лесного покрова на ЕТР в целом приближенно оценивалась в 1,3% (Potapov et al., 2015). По территории Сибири такие оценки вообще не публиковались. В рамках настоящей работы для оценки значимости ветровалов как фактора повреждения лесного покрова ЕТР и Сибири, наряду с созданными базами данных о ветровалах, использованы тематические продукты обработки снимков Landsat Global Forest Change (Hansen et al., 2013) и Global Forest Loss Due to Fires (Tyukavina et al., 2022). Эти продукты содержат информацию обо всех участках гибели лесов и о потерях лесов, вызванных пожарами за 2001–2020 гг. соответственно. На их основе рассчитаны следующие характеристики (отдельно для ЕТР и Сибири).

1. Вклад ветровалов в общую площадь потерь лесного покрова, или отношение площади ветровалов за 2001–2020 гг. к общей площади потерь лесного покрова по данным GFC (рис. 3.17 а).
2. Соотношение площади гибели лесов от пожаров и ветровалов за 2001–2020 гг. (рис. 3.17 б).

Доля ветровалов в общей площади потерь лесного покрова за 2001–2020 гг. в среднем по ЕТР оценена в 2,6%, что в два раза выше ранее опубликованной оценки (Potapov et al., 2015). Однако сравнивать эти оценки напрямую некорректно, поскольку рассматривались разные временные периоды. Кроме того, использованные в настоящей работе данные о ветровалах значительно более полные, чем в работе (Potapov et al., 2015). Наибольшая доля ветровалов от общей площади потерь лесов наблюдается на западном склоне Северного Урала. Это связано не только с высокой повторяемостью крупных ветровалов, но и с малым объемом лесозаготовок, поскольку значительная часть территории относится к ООПТ федерального значения. Также темнохвойные леса Северного Урала характеризуются низкой подверженностью пожарам (Shikhov et al., 2019). В пределах ООПТ, где лесозаготовка исключена, на ветровалы приходится более 50% нарушений лесного покрова.



**Рис. 3.17.** Отношение площади ветровалов к общей площади гибели лесов (а) и отношение площади гибели лесов от ветровалов и пожаров (б), за 2001–2020 гг. в лесной зоне ЕТР

Также доля ветровалов в структуре потерь лесного покрова превышает 10% в Ярославской, Костромской, Вологодской областях и на северо-западе ЕТР (в Новгородской, Ленинградской области и на юге Карелии). Эти локальные максимумы связаны с катастрофическими ветровалами 27.06.2010 и 29.07.2010 г. Минимальная доля ветровалов в структуре потерь лесного покрова характерна для северной части Карелии, севера Архангельской области и Республики Коми, а также для лесостепной зоны. Это обусловлено отсутствием крупных ветровалов в перечисленных районах, а в Архангельской области и в Карелии – также большой площадью вырубок.

Соотношение площади ветровалов и гарей на ЕТР отличается сильной пространственной неоднородностью. В целом гари преобладают в северной и в южной части лесной зоны, а ветровалы – в ее центральной части. Общая площадь лесов, погибших от пожаров на ЕТР за 2001–2020 гг. по данным (Тукавина et al., 2022) составляет  $\approx 10491 \text{ км}^2$ , что приблизительно в 4,2 раза больше площади крупных ветровалов за этот же период. Свыше половины всей

площади гарей (свыше 6000 км<sup>2</sup> по данным (Potapov et al., 2015)) приходится на экстремальный пожароопасный сезон 2010 г., с учетом лесов, пройденных огнем в июле-августе 2010 г. и погибших на следующий год после пожаров. Для сравнения, в Европе в целом по современным оценкам (Forzieri et al., 2021) доля потерь лесов от пожаров и ветровалов составляет соответственно 34% и 40% от всех потерь, вызванных природными факторами (т.е. роль ветровалов существенно выше, чем на ЕТР).

Сопоставляя пространственное распределение площади гарей и ветровалов, можно отметить некоторую обратную зависимость. На территориях, где значительная часть потерь лесного покрова обусловлена пожарами, отсутствуют крупные ветровалы, и наоборот, на участках, где распространены крупные ветровалы, отсутствуют крупные гари (исключением является юг Архангельской области, где крупные гари и ветровалы встречаются на одних и тех же участках). Однако зависимость статистически не значима (ранговый коэффициент корреляции Спирмена между этими показателями равен  $-0,08$ ). Для регионов, где роль ветровалов как фактора нарушений лесного покрова выше, чем роль пожаров (от Смоленской области на западе до Пермского края на востоке) характерно преобладание смешанных елово-мелколиственных либо темнохвойных лесов, которые отличаются низкой природной пожароопасностью (Барталев и др., 2015). Это обуславливает низкую повторяемость крупных пожаров.

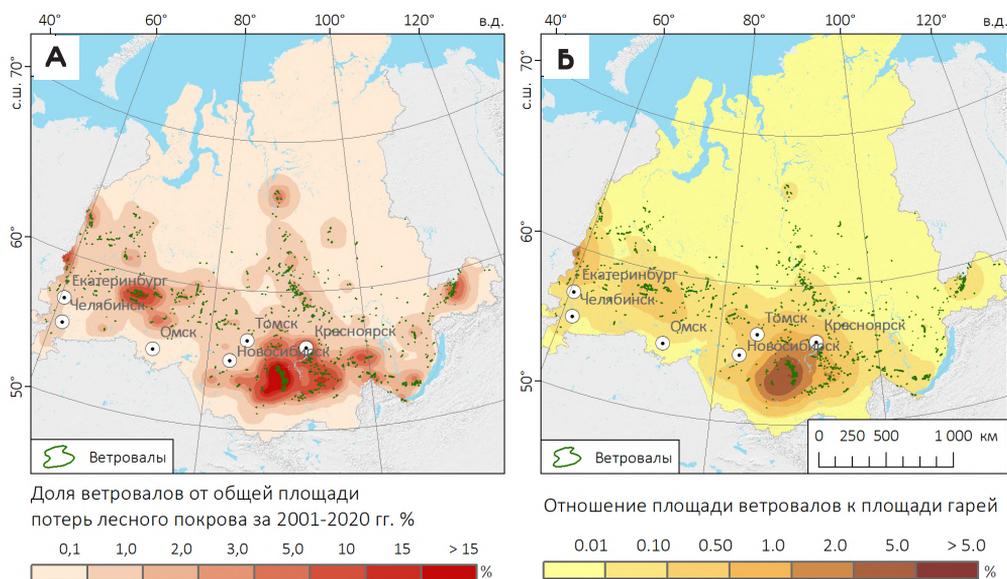
В свою очередь, в регионах южной части Центрального и Волго-Вятского районов, а также на большей части территории Республики Коми и Архангельской области площадь гарей в десятки или в сотни раз превышает площадь ветровалов. Это связано с крупными вспышками лесных пожаров в 2002, 2010–2011, а на севере ЕТР также в 2013 г. Возникновению крупных лесных пожаров в перечисленных регионах способствовали различные факторы. Среди них можно отметить экстремально засушливые условия летних сезонов 2002 и 2010 гг. (Анализ условий..., 2011), широкое распространение пожароопасных сосновых лесов, труднодоступность территории (в республике Коми), большие площади осушенных торфяников (в Рязанской, Владимирской областях) и др.

Аналогичные расчеты были проведены для Западной и Центральной Сибири (рис. 3.18). Главной отличительной особенностью лесной зоны Сибири в сравнении с ЕТР является доминирование пожаров в структуре нарушений лесного покрова, тогда как на ЕТР основной причиной потерь лесов являются вырубki. В среднем по изучаемой территории 70,8% потерь лесного покрова

связано с пожарами (тогда как на ЕТР этот показатель не превышает 11%). На ветровалы приходится всего 0,4% от общей площади потерь лесов (в 6,5 раза меньше, чем на ЕТР). В Западной Сибири доля ветровалов от площади всех потерь лесов в среднем составляет чуть менее 1%, согласно (Шихов и др., 2022), а в Центральной Сибири она еще уменьшается за счет более широкого распространения пожароопасных сосновых и лиственничных лесов.

Однако и в Сибири есть регионы, где ветровалы являются значимым фактором нарушения лесного покрова. В частности, это Кузнецкий Алатау, южная часть Красноярского края (предгорья Восточного и Западного Саяна), а также западная, южная и северо-восточная часть Иркутской области. В этих районах широко распространены темнохвойные леса, характеризующиеся относительно низкой пожароопасностью, но высокой подверженностью ветровалам (Барталев и др., 2016; Kharuk et al., 2021). Наиболее редко ветровалы отмечаются в восточной части Западной Сибири, а также в восточной части Красноярского края и на севере Иркутской области, где преобладают лиственничные леса, устойчивые к ветровому воздействию.

В северной части Западной и Центральной Сибири (к северу от 60° с.ш.) площадь потерь лесов от пожаров превышает площадь ветровалов в 100 раз и более. Наиболее масштабные пожары отмечались на данной территории в 2012 г. (Лупян и др., 2017). Южнее вклад ветровалов начинает увеличиваться, но только в горах Кузнецкого Алатау ветровалы являются более значимым фактором потерь лесного покрова, чем пожары. В Иркутской области, где наблюдалось большинство выявленных в Сибири крупных ветровалов (см. п. 3.2) их вклад в общую площадь потерь лесов остается незначительным. Площадь гарей превышает площадь ветровалов в 30-100 раз, причем пожары часто возникают на участках, ранее поврежденных ветровалами, что затрудняет оценку площади последних.



**Рис. 3.18.** Отношение площади ветровалов к общей площади гибели лесов (а) и отношение площади гибели лесов от ветровалов и пожаров (б), за 2001–2020 гг. в лесной зоне Западной и Центральной Сибири

### Крупные ветровалы на ООПТ федерального значения и на малонарушенных лесных территориях

Ветровалы часто происходят в пределах заповедников и национальных парков, поскольку на ООПТ широко распространены спелые и перестойные леса, наиболее подверженные воздействию ветра (Петухов, 2016). Ряд случаев крупных ветровалов в заповедниках описан в литературе (Алесенков и др., 2006; Пузаченко, 2007; Петухов, 2016), в ежегодных Летописях природы (Динамика явлений и процессов..., 2018) и на других информационных ресурсах ООПТ (Окский государственный..., 2021). Наиболее катастрофическим является ветровал в Висимском заповеднике 06.06.1995 г., в результате которого было уничтожено до 80% темнохвойных лесов на территории заповедника (Алесенков и др., 2006).

На основе созданных баз данных выявлено 66 случаев пересечения ветровалов из базы данных с границами ООПТ федерального значения. Они относятся к 25 различным заповедникам и национальным паркам. В 50 случаях площадь ветровала в пределах ООПТ превышала 25 га. Общая площадь

выявленных сплошных ветровалов на ООПТ за период 1986-2020 гг. составляет 9780 га, в том числе на ЕТР – 8714 га. Перечень наиболее крупных из них приведен в табл. 3.13.

Таблица 3.13  
Крупнейшие ветровалы на ООПТ федерального значения

Название ООПТ	Дата ветровала	Площадь ветровала в пределах ООПТ, га	Причина возникновения
Заповедник «Вишерский»	08.10.2015	1266	Отложение мокрого снега с ветром
Национальный парк «Водлозерский»	10.08.2010	1045	Шквал
Байкало-Ленский заповедник	2001 г.	1078	Шквал
Центрально-Лесной биосферный заповедник	07.08.1987	968	Штормовой ветер с интенсивными осадками
Национальный парк «Водлозерский»	30.05.2000	876	Шквал
Печоро-Илычский биосферный заповедник	07.06.2009	770	Шквал
Национальный парк «Югыд-Ва»	10.08.2010	741	Шквал
Печоро-Илычский биосферный заповедник	30.06.1993	391	Шквал
Национальный парк «Югыд-Ва»	1994 г.	258	Снегопад
Центрально-Лесной биосферный заповедник	12.07.1996	255	Шквал
Окский биосферный заповедник	14.07.2020	250	Шквал
Заповедник «Кологривский лес»	15.05.2021	168	Шквал

Как следует из табл. 3.13, большинство крупных ветровалов произошло в пределах ООПТ, расположенных на западном склоне Северного Урала, где сохранился крупный массив первичных темнохвойных лесов и наблюдается наибольшая плотность ветровалов в целом по ЕТР. Только в Печоро-Илычском заповеднике выявлено 13 случаев ветровалов, которые относятся к девяти различным датам. Однако доля ветровалов от общей площади ООПТ здесь

невелика (в Печоро-Илычском заповеднике – 0,23%, в Вишерском – 0,52%). Наибольшая доля площади ветровалов характерна для Центрально-Лесного заповедника (5,25% площади). Здесь крупные ветровалы происходили три раза за рассматриваемый период: в 1987, 1996 и 2017 гг., причем в 1987 г. от ветровала в той или иной степени пострадала вся площадь заповедника. Также значительный ущерб отмечался в других заповедниках Центра ЕТР – в Окском заповеднике в 2020 г., в заповеднике «Кологривский лес» в 2021 г. На севере и северо-западе ЕТР наиболее крупные ветровалы наблюдались в Национальном парке «Водлозерский» в 2000 и 2010 гг.

Также для ЕТР рассмотрено положение ветровалов относительно малонарушенных лесных территорий (МЛТ), выделенных по снимкам Landsat по состоянию на 2013 г. (Potarov et al., 2017). Общая площадь МЛТ в пределах лесной зоны ЕТР составляет 288,6 тыс. км<sup>2</sup>, или 18,2% от всей площади лесов, в Западной и Центральной Сибири – свыше 1,27 млн. км<sup>2</sup> (41,3% от общей площади лесов). На ЕТР большая часть МЛТ расположена в Республике Коми, Архангельской области и Карелии, а в Сибири – в северной части и в южных горных районах.

Всего с участками МЛТ пересекаются 437 ветровалов, общая площадь ветровалов на МЛТ за период 1986–2020 гг. составляет 61840 га (13,9% от общей площади ветровалов), в том числе на ЕТР – 29140 га (9,2% всей площади ветровалов на ЕТР). Примечательно, что на ЕТР доля площади ветровалов от площади МЛТ составляет всего 0,1%, в то время как доля ветровалов от всей площади лесов – 0,21%. Из этого следует, что МЛТ меньше подвержены ветровалам, чем леса ЕТР в целом. При этом в состав МЛТ входят подверженные ветровалам массивы темнохвойных лесов Северного Урала. Объяснить низкую долю ветровалов в площади МЛТ можно их северным положением. Действительно, основная часть МЛТ расположена между 62° и 67° с.ш., т.е. севернее, чем зона наибольшей повторяемости ветровалов, которая примерно протекает вдоль 60° с.ш.

Похожее соотношение характерно и для Сибири, где доля площади ветровалов на МЛТ в полтора раза ниже, чем в среднем по лесной зоне. Это также объясняется особенностью положения МЛТ – большая часть их площади приурочена к северной части лесной зоны, где крупные ветровалы отмечаются реже, чем на юге.

### **3.5. Некоторые закономерности, определяющие подверженность лесов ветровалам**

В настоящем разделе рассматриваются основные факторы и выделены некоторые ключевые закономерности, определяющие подверженность лесов воздействию ветровалов. В частности, оцениваются зависимости площади ветровалов и степени повреждения от породного состава и возраста лесных насаждений, а также от факторов местоположения. Для этого проанализировано 10 крупных ветровалов, произошедших в разных районах ЕТР и Урала с существенно различающимися физико-географическими условиями, и вызванных различными метеорологическими явлениями. Исследование проведено на основе открытых спутниковых данных и цифровых моделей рельефа (ЦМР). Недоступность детальных данных о таксационных параметрах насаждений, а также характеристик почвенного покрова на участках ветровалов накладывает существенные ограничения на проведение подобного анализа и детальность результатов. Однако они в любом случае являются полезными, поскольку до настоящего времени исследования по данному направлению в России имели единичный характер.

#### **Методика анализа факторов, определяющих подверженность лесов ветровалам**

Выборка крупных ветровалов была сформирована на основе вышеописанной базы данных. Всего для анализа выбраны 10 крупных ветровалов, 7 из которых вызваны шквалами, 2 – смерчами и один – сильным летним снегопадом (рис. 3.19, табл. 3.14). Выборка включает крупнейшие ветровалы площадью свыше 5 тыс. га или их участки (если ветровал не покрывается одним снимком Landsat). Также в нее 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. Один из рассмотренных ветровалов, произошедший в районе Висимского заповедника 06.06 1995 г. (Алесенков и др., 2006), не включен в базу данных, так как расположен в основном к востоку от Уральского хребта.

Для каждого случая 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 г. на Северном Урале (область выделена на рис. 3.19), получены снимки сверхвысокого пространственного разрешения с сервиса ArcGIS Imagery, которые использовались для оценки степени повреждения древостоя.

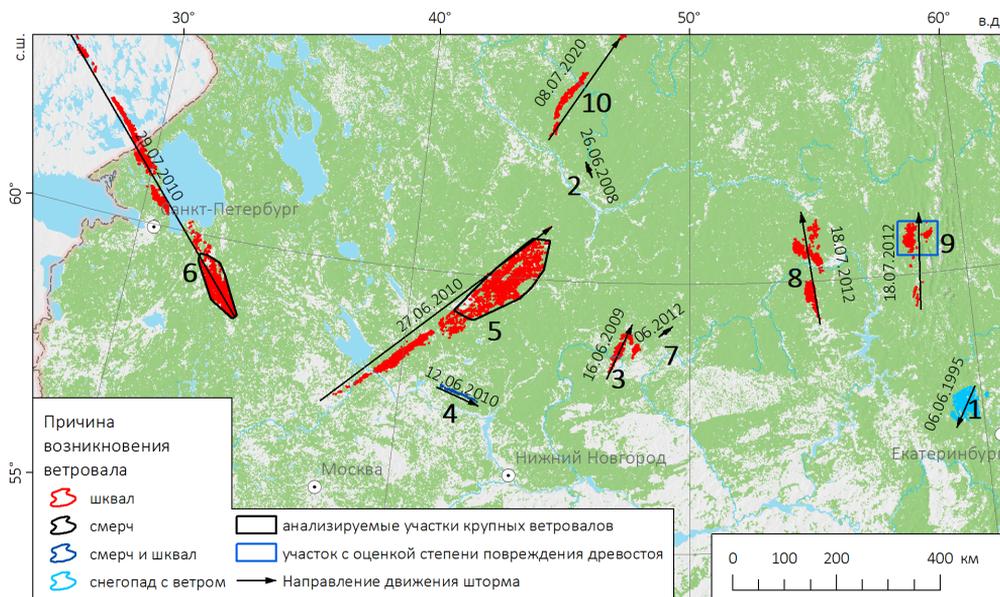


Рис. 3.19. Пространственное расположение анализируемых случаев ветровалов.

Таблица 3.14

Общая характеристика рассматриваемых случаев ветровалов

Номер ветровала на рис. 3.19	Дата ветровала	Геометрические характеристики (весь трек и анализируемый участок)			Доля лесопок-рытой территории, %	Отношение площади нарушений лесного покрова по данным GFC за предшествующие ветровалу 10 лет ко всей лесопокрытой территории (%)
		Длина, км	Площадь, км <sup>2</sup>	Макс. ширина, км		
1	06.06.1995	161,3/95,7	174,8/166,5	118,2/96,2	85,7	Нет данных
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

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

- ЦМР с размером ячейки 30 м, построенная по данным цифровой топографической карты М 1:100000 – только для ветровалов на территории Пермского края.
- ЦМР SRTM-90 с шагом сетки 3'' (SRTM-90..., 2021) – для ветровалов, расположенных за пределами Пермского края, но южнее 60° с.ш.
- ЦМП ALOS World Topographic Data (ALOS Global..., 2021) – для ветровалов, расположенных севернее 60° с.ш.

### **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. 3.20 а). 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, ETM+ или OLI), полученного в течение вегетационного периода. Классификация выполнена с применением обучаемого алгоритма Random Forest Classifier (Rodriguez-Galiano et al., 2012). Для классификации были подготовлены изображения, включающие три наиболее информативных спектральных канала – красный, ближний 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. напр. Novi et al., 2017). Для уточнения состава классов использована карта растительности России, полученная по данным низкого пространственного разрешения MODIS (Барталев и др., 2011, 2016) и снимки сверхвысокого разрешения 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).

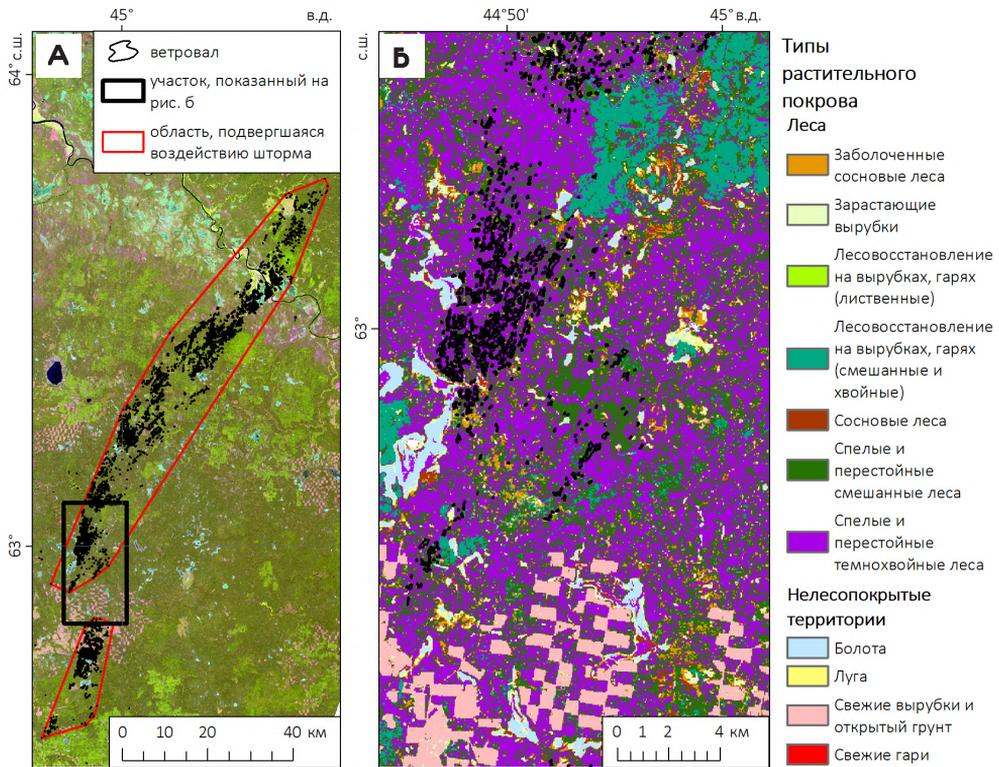
Для полученных результатов классификации была реализована процедура постобработки с целью выделения двух классов насаждений по возрасту – молодняков (возраст 30–40 лет и менее) и спелых и перестойных насаждений. Возможности более детальной оценки возраста ограничены отсутствием необходимых данных. Необходимость выделения молодняков обусловлена тем, что они обычно слабо подвержены ветровалам (Ulanova, 2000; Петухов, 2016). По данным GFC и EEFCC были выделены все сравнительно крупные ( $S > 3$  га) участки потерь лесного покрова, произошедшие за период с 1986 г. до года, когда

произошел 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 было проведено маскирование лесопокрытых территорий. Все участки, которые в 1985–1987 гг. еще были не покрыты лесом, а по снимку, полученному перед ветровалом, были классифицированы как лесопокрытые территории, также были отнесены к молоднякам.

В группу молодняков попадают леса, восстанавливающиеся на вырубках и гарях, а также на неиспользуемых сельхозугодьях. Учитывая неопределенность при оценке возраста насаждений по спутниковым данным, все смешанные и темнохвойные леса, не попавшие в группу молодняков, были классифицированы как спелые и перестойные. Пример полученного результата классификации после постобработки приведен на рис. 3.20.

Оценку точности проведенной классификации по стандартной схеме (см. напр. Денисова и др., 2019) не удалось выполнить по причине отсутствия материалов лесной таксации или иных проверочных данных на поврежденные ветровалами участки. Для получения общего представления о степени неопределенности классификации рассмотрены значения метрики Precision, известной также как точность пользователя. Она рассчитывается в пакете SNAP непосредственно в процессе классификации, на основе степени совпадения ее результатов с обучающими данными.

В большинстве случаев значения метрики Precision для выделенных классов превышали 0,85, что указывает на высокую надежность результатов классификации. Исключением был ветровал № 5 (рис. 3.19), 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 участка № 5, наибольшее значение метрики Precision получено для мелколиственных лесов (0,91), а минимальное – для сосновых не заболоченных лесов (0,82). Последнее обусловлено частичным перекрытием данного класса с темнохвойными лесами.



**Рис. 3.20.** Результаты классификации породного состава и возрастной структуры лесов, подвергшихся воздействию ветровала, на примере события 08.07.2020 г.: а) исходный снимок Landsat-8, б) увеличенный фрагмент классифицированного изображения.

### Анализ морфометрических характеристик рельефа

Согласно ранее опубликованным данным (Lässig, Močalov, 2000; Ulanova, 2000; Suvanto et al., 2016), породный состав и возраст насаждений являются ведущими факторами, определяющими подверженность лесов ветровалам. Поэтому влияние прочих факторов оценивалось отдельно для каждого класса насаждений. Для оценки влияния рельефа на характер и степень повреждения древостоя рассчитан ряд морфометрических характеристик, а именно, индекс наветренного и подветренного склона (Windward/Leeward Index) и параметр выпуклости (Convexity). Также выполнены классификации форм рельефа по

схеме (Iwahashi, Pike, 2006). Расчеты выполнены средствами ГИС SAGA (SAGA..., 2021).

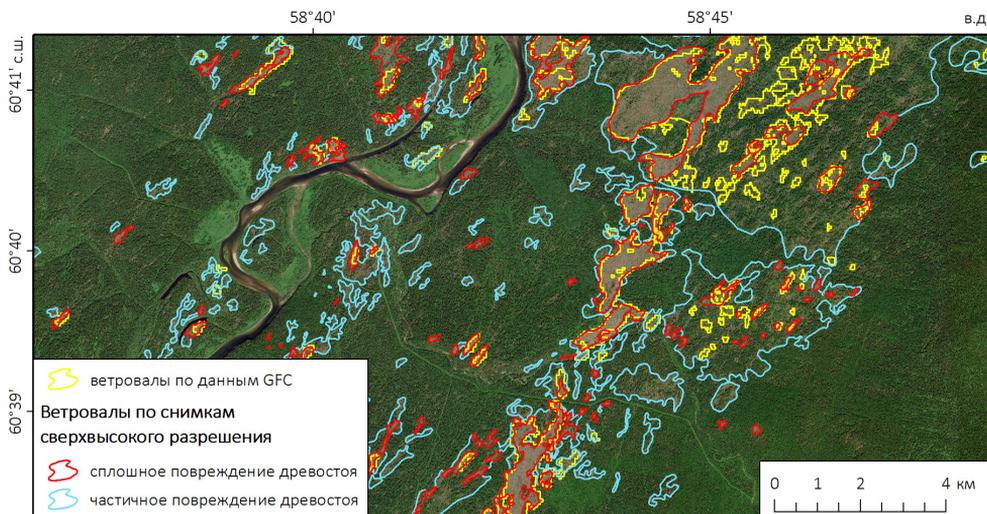
Индекс наветренного и подветренного склона представляет собой коэффициент усиления или ослабления ветра, рассчитываемый по ЦМР и заданному направлению ветра (Boehner, Antonic, 2009). Направление ветра при расчете было задано аналогичным направлению движения шторма. Статистически значимая зависимость повреждения лесов ветровалами от значений этого индекса была показана, в частности, в работе (Shikhov et al., 2019). Выпуклость склона рассчитывается как дополнительный выходной слой при классификации форм рельефа. Большая подверженность выпуклых склонов ветровалам в сравнении с вогнутыми склонами была показана ранее в работах (Klaus et al., 2011; Hanewinkel et al., 2014).

Влияние соседства со свежими вырубками (new open area proximity) на подверженность лесов ветровалам показано в работах (Suvanto et al., 2016, 2019). 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  $S \geq 3$  га) свежих вырубок (возрастом до 10 лет). Ширина буферной зоны принята равной пяти пикселям снимка Landsat (150 м), что несколько больше, чем в работе (Suvanto et al., 2016) по причине более низкого пространственного разрешения исходной информации.

Все анализируемые участки до ветровала имели долю лесопокрытой площади свыше 70%, что близко к средним значениям по данной территории. Они отличались разной интенсивностью лесопользования. Наибольшие потери лесов по данным GFC за предшествующие 10 лет отмечались на участке ветровала № 8, на северо-западе Пермского края (табл. 3.14). Однако эти потери были обусловлены не только рубками, но и еще одним крупным ветровалом, который произошел 07.06.2009 г., а также пожарами летом 2010 г. (Shikhov et al., 2019). На остальных участках величина потерь не превышала 4,6%. Для оценки влияния породно-возрастного состава лесов рассчитано отношение поврежденной ветровалом площади к общей площади леса данного типа.

Также были использованы описанные в разделе 2.3 данные по оценке степени повреждения древостоя для ветровала, произошедшего 18.07.2012 г. на Северном Урале (выделен на рис. 3.19) на основе визуального анализа снимков сверхвысокого пространственного разрешения с сервиса ArcGIS Imagery. Пример выделенных контуров ветровала с разной степенью повреждения

приведен на рис. 3.21. Оценка зависимостей доли поврежденных насаждений от характеристик рельефа выполнена как для всей площади ветровала (выделенной по данным GFC), так и отдельно для участков со сплошным и частичным повреждением древостоя.



**Рис. 3.21.** Ветровалы, выделенные по данным GFC и по снимкам сверхвысокого пространственного разрешения с оценкой степени повреждения древостоя.

### **Количественная оценка факторов, определяющих подверженность лесов ветровалам**

Доля площади, поврежденной ветровалом, различается в десятки раз в зависимости от породного состава и возраста насаждений (табл. 3.15). Максимальный процент повреждения ветровалом отмечен в темнохвойных лесах (для 8 из 10 рассматриваемых ветровалов), а минимальный – в мелколиственных, восстанавливающихся на вырубках и гарях, что соответствует известным закономерностям (Lässig, Močalov, 2000, Петухов, 2016). Причем для молодых мелколиственных лесов приведенные в табл. 3.15 значения могут быть завышены, поскольку на них влияют пиксели, попадающие на границы классов.

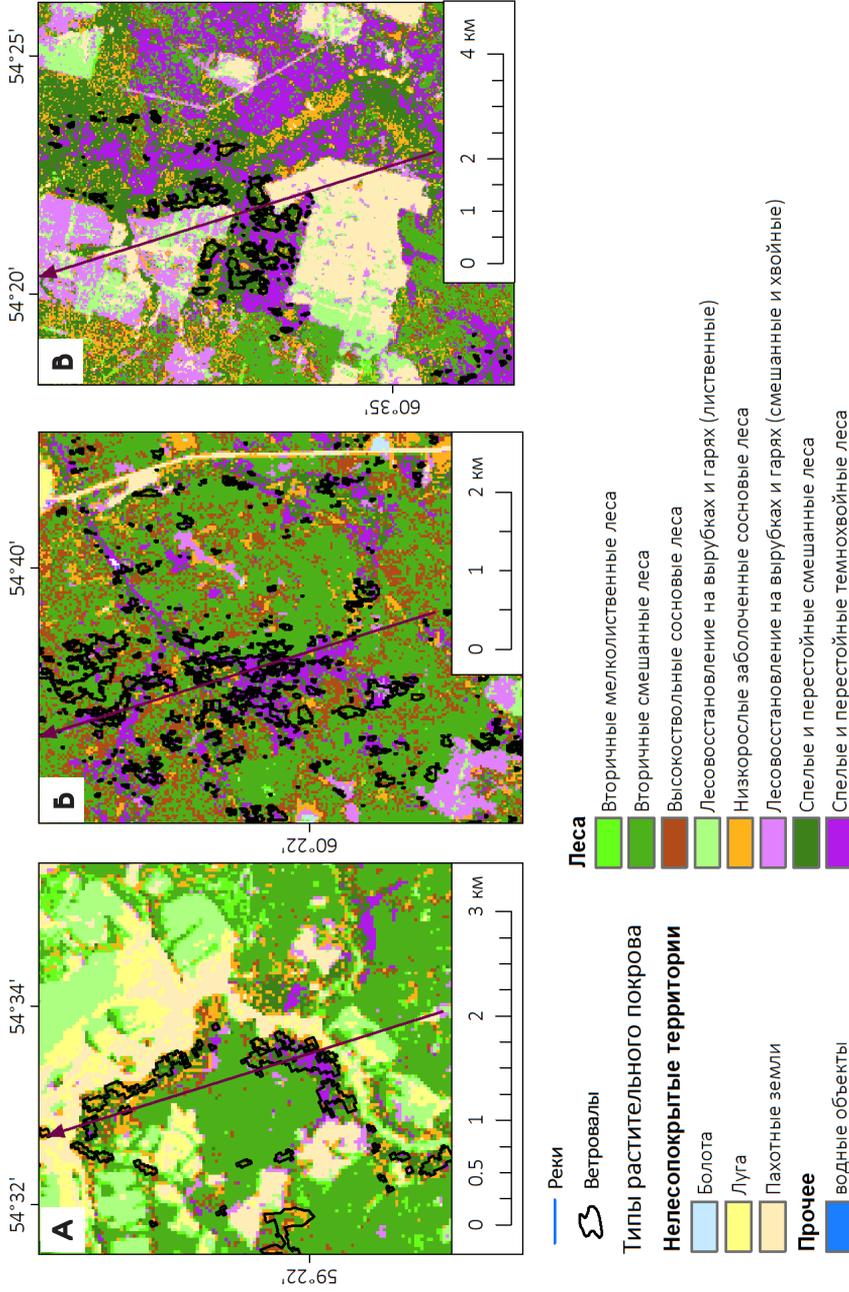
Высокий процент повреждения характерен также для спелых и перестойных смешанных лесов – всего в 1,1–1,5 раза меньше, чем для темнохвойных. В наибольшей степени они пострадали при ветровалах 18.07.2012 в Пермском

крае и 08.07.2020 в Архангельской области, причем в последнем случае это были леса, сформировавшиеся в результате естественного распада ельников (Девятова и др., 2009).

Таблица 3.15

Доля сплошного ветровала от площади разных типов леса, в зависимости от породного состава и возраста насаждения. Выделены максимальные значения для каждого ветровала

Номер ветровала на рис. 3.19 и тип вызвавшего его явления	Доля основных типов леса (% от рассматриваемой территории) и площадь ветровалов в них (% от площади данного типа леса)					
	Спелые и перестойные леса			Вторичные леса на вырубках, гарях, сельхозугодьях		Низкорослые заболоченные сосновые леса
	Темно-хвойные	Сосновые	Смешанные	Мелко-лиственные	Смешанные и хвойные	
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



**Рис. 3.22.** Особенности пространственного распределения ветровалов на локальном уровне, обусловленные характеристиками древостоя: а) 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.

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 г. в Архангельской области, наибольшие повреждения получили сосновые насаждения на террасах долины р. Пинеги. В других случаях доля поврежденных ветровалом сосновых лесов была лишь в 1,5–2,2 раза меньше, чем тот же показатель для темнохвойных лесов.

Характер повреждения древостоя также различается в зависимости от метеорологического явления, которым вызван ветровал. Так, смерчевые ветровалы отличаются преобладанием сплошного нарушения лесного покрова. По причине высокой скорости ветра при смерчах существенно повреждаются не только спелые и перестойные леса, но даже молодняки. По периферии ветровала отмечаются фрагментарные повреждения наименее устойчивых насаждений. В результате максимальная ширина ветровала может существенно превышать ширину сплошного повреждения древостоя. Такой эффект отмечен во всех трех рассматриваемых случаях со смерчами.

Для ветровалов, вызванных шквалами, характерна меньшая доля сплошного повреждения, а мелколиственные леса возрастом до 30–40 лет повреждены минимально (табл. 3.15). В смешанных лесах основной ущерб приурочен к участкам с повышенной долей хвойных пород, также существенно повреждаются участки спелого и перестойного леса в водоохранных зонах (рис. 3.22). Последнее иногда приводит к увеличению площади сплошных ветровалов в долинах рек, хотя обычно более подверженными считаются возвышенные участки (Петухов, 2016).

### **Влияние факторов местоположения на подверженность лесов ветровалам**

Оценка зависимости повреждения лесов ветровалами от характеристик рельефа выполнена для наиболее подверженных их воздействию спелых и перестойных темнохвойных и смешанных лесов (табл. 3.16). Проанализировано влияние двух морфометрических параметров – индекса наветренного и подветренного склона (Windward/Leeward Index) и выпуклости (Convexity). Для оценки зависимостей соответствующие значения переменных разбиты на градации (Windward/Leeward Index – с шагом 0,025, Convexity – с шагом 0,03) и выполнен расчет доли площади ветровала в пределах каждой градации. Рассчитаны коэффициенты ранговой корреляции Спирмена между значениями

морфометрических параметров и долей площади сплошного ветровала в каждом типе леса. Для ветровала № 9 расчет выполнен также отдельно для участков с полным и частичным повреждением древостоя, которые были выделены по снимкам сверхвысокого разрешения.

В целом устойчивые (статистически значимые для большинства ветровалов) зависимости площади повреждений лесов ветровалами от обоих рассмотренных морфометрических параметров не выявлены. 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, для которых она может считаться наиболее устойчивой по причине большой площади поврежденных насаждений. Так, на рассматриваемом участке ветровала № 5 доля площади поврежденных насаждений на наветренных склонах оказалась в 3–6 раз выше, чем на подветренных склонах (рис. 3.23).

Однако в некоторых случаях возможна и обратная зависимость, когда площади ветровала увеличиваются в отрицательных формах рельефа. Так, при ветровале 08.07.2020 в Архангельской области (ветровал № 10 на рис. 3.19) наибольшие повреждения получили леса на террасах 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.

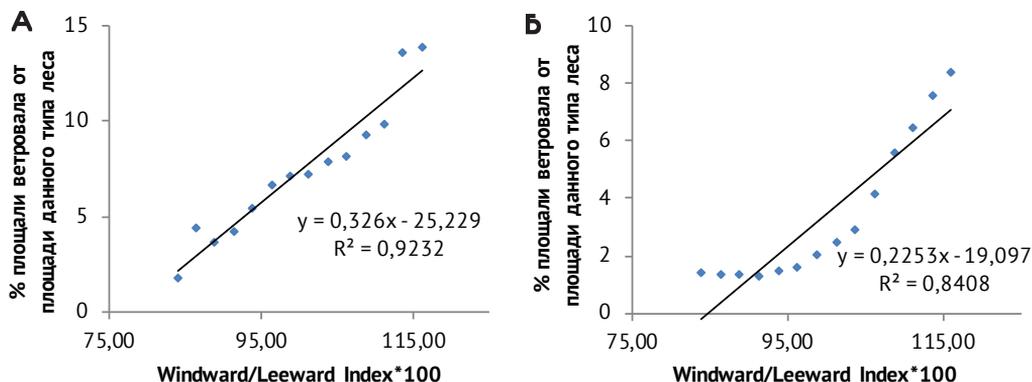
Влияние выпуклости склонов на площадь ветровалов в целом оказалось схожим с влиянием Windward/Leeward Index. Исключением является ветровал № 1, поскольку в данном случае наибольшие повреждения от ветра получили леса в нижней части склонов гор, а вблизи вершин (на выпуклых участках) степень повреждения была меньше, вероятно, по причине адаптированности древостоя к сильным ветрам (Алесенков и др., 2006). Для смерчевых ветровалов оба параметра (Windward/Leeward Index и выпуклость) малоинформативны по причине непостоянного направления ветра в смерче.

Таблица 3.16.

Зависимости доли площади лесов, пострадавших от ветровала, от значений индекса наветренного и подветренного склонов и выпуклости рельефа

Номер ветровала на рис. 3.19 и тип вызвавшего его явления		Коэффициенты корреляции Спирмена между процентом площади ветровала в данном типе леса и морфометрической характеристикой			
		Windward/Leeward 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

Выделены статистически значимые коэффициенты корреляции при уровне значимости 0,05.



**Рис. 3.23.** Зависимости процента площади сплошных ветровалов в темнохвойных (а) и смешанных (б) лесах от значений индекса наветренного и подветренного склона.

Зависимость площади ветровалов от близости к свежим вырубкам оценивалась только для ветровалов, вызванных шквалами (табл. 3.17). Ветровалы, вызванные смерчами, имеют недостаточную площадь для получения подобных оценок, а для ветровала № 1 расчет не проводился в связи с отсутствием данных GFC.

Таблица 3.17

Зависимость площади лесов (%), поврежденных ветровалами, от близости к свежим вырубкам и другим нарушениям лесного покрова

Номер ветровала на рис. 3.19 и тип вызвавшего его явления	Доля площади ветровала от общей площади внутри буферной зоны вокруг свежих вырубок (числитель) и по всей территории (знаменатель)		
	Темнохвойные леса	Смешанные леса	Сосновые леса (в.т.ч. 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

В большинстве случаев площадь ветровалов на участках, примыкающих к свежим вырубкам (находящиеся на расстоянии  $\leq 150$  м от них), оказалась в 1,5–3 раза больше, чем в целом по рассматриваемой территории. Причем данная зависимость хорошо выражена для ветровалов № 5 и № 6, занимающих наибольшую площадь, где количество свежих вырубков превышало 1 тыс. на каждом из участков. 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 не выражена, либо проявляется не для всех типов леса.

Таким образом, породный состав и возраст насаждений имеют определяющее влияние на подверженность лесов ветровалам. Доля площади ветровалов в разных типах леса различается в 5–10 раз и более. Наиболее подвержены ветровалам спелые и перестойные темнохвойные и смешанные леса, в отдельных случаях сухие сосновые леса, а в наименьшей степени – вторичные мелколиственные леса. На этом фоне зависимости подверженности лесов ветровалам от факторов местоположения неустойчивы и имеют разнонаправленный характер. В большинстве случаев, связанных со шквалами имеется статистически значимая корреляция между долей площади ветровала и значениями индекса наветренного и подветренного склона Windward/Leeward Index, рассчитанного по ЦМР. Также для большинства ветровалов выявлено увеличение площади повреждений древостоя в 1,5–3 раза на участках леса, находящихся в непосредственной близости от свежих рубок. Полученные оценки зависимостей подверженности лесов ветровалам от характеристик насаждений и факторов местоположения могут быть основой для моделирования риска ветровалов. Однако неустойчивость таких зависимостей подтверждает большую роль случайных факторов в возникновении ветровалов и сложность их прогнозирования на региональном уровне что ранее подчеркивалось и другими исследователями (Bouchard et al., 2009).

### **3.6. База данных и картографический веб-сервис «Смерчи в лесной зоне России»**

Публикация данных о ветровалах на открытых картографических сервисах, обеспечивающих доступ к ним как для научного сообщества, так и для других заинтересованных пользователей, расширяет возможности их практического

применения. Картографический веб-сервис (Смерчи в лесной зоне России..., 2021) был разработан с целью публикации в открытом доступе данных о случаях смерчей, вызвавших нарушения лесного покрова на территории России (Каталог случаев смерчей..., 2016). Данные, опубликованные на этом сервисе, вошли в структуру баз данных смерчей в Северной Евразии (Chernokulsky et al., 2020a), и ее актуализированной версии для территории России (Чернокульский и др., 2021). В связи с этим, в базе данных сервиса представлена информация о смерчах, вызвавших ветровалы не только на ЕТР, но и в Сибири. Данные о ветровалах, вызванных смерчами, получены за период с 2001 г. по настоящее время и актуализируются по мере поступления информации.

### **Структура, информационное наполнение базы данных и функциональные возможности веб-сервиса**

Картографическая база данных, опубликованная на сервисе, включает информацию о ветровалах за период с 2001 г. по настоящее время, а также дополнительные классы объектов. Класс объектов ветровалов включает смерчевые ветровалы площадью  $\geq 5$  га (по всей территории России) и прочие ветровалы, вызванные шквалами, штормовыми ветрами, сильными снегопадами площадью  $\geq 25$  га (только по ЕТР). Данные за 2021-2022 гг. находятся в процессе актуализации (см п. 5.1.3).

В базе данных хранятся контуры ветровалов, а также их центроиды (точки). При отображении на сервисе в мелком масштабе ветровалы отображаются как точечные объекты, на крупных масштабах (1:100000 и крупнее) происходит переключение на полигональный слой. Атрибутивная таблица хранится в виде отдельного файла, ее структура показана в табл. 5.1.

Дополнительные классы объектов – границы субъектов РФ и муниципальное деление на основе данных OpenStreetMap (NextGIS, 2021) – используются для расчета распределения ветровалов по административно-территориальным единицам и не отображаются на сервисе. Для заполнения базы данных и расчета некоторых характеристик ветровалов разработаны программные инструменты на языке Python. Картографическая основа подключается как WMS-сервис базовой карты. На сервисе доступны 4 варианта базовой карты – данные OpenStreetMap, а также мозаики спутниковых снимков высокого разрешения с сервисов ArcGIS Imagery, Google Maps и Here Maps. Эти сервисы обеспечивают наибольший процент покрытия территории России архивными снимками сверхвысокого разрешения.

Помимо пространственных данных и основных атрибутивных характеристик, перечисленных в табл. 5.1, с помощью активных ссылок в описании каждого ветровала реализован доступ к дополнительной информации в виде изображений и видеофайлов.

Синоптические карты для ЕТР и Урала, построенные по данным систем реанализа CFS и ERA5 в программном пакете GrADs, доступны для случаев ветровалов с известной датой и временем возникновения, которые наблюдались на ЕТР или на Урале (всего 366 случаев). В частности, это поля геопотенциала  $AT_{500}$ , температуры воздушной массы на изобарической поверхности 850 гПа, а также композитного параметра SWEAT, характеризующего риск возникновения шквалов и смерчей.

Таблица 3.18  
Структура атрибутивного описания ветровалов на сервисе «Смерчи в лесной зоне России»

Имя поля	Тип, длина поля	Описание
id	Целочисленное	Идентификатор объекта
type	Текстовое, 10	Тип метеорологического явления, вызвавшего ветровал (смерч, шквал, штормовой ветер, снегопад)
date	Дата	Дата возникновения ветровала
date_unit	Текстовое, 10	Для события с известной датой – D, для событий, в которых известен только год возникновения – Y
time	Текстовое, 10	Время по ВСВ, когда произошел ветровал
accuracy_s	Дата	Дата последнего спутникового снимка (Landsat/Sentinel-2), полученного до ветровала
accuracy_s	Дата	Дата первого спутникового снимка (Landsat/Sentinel-2), полученного после ветровала
region	Текстовое, 255	Субъект РФ, в котором расположен ветровал (или его центроид)
region_id	Целочисленное	Идентификатор субъекта РФ
district	Текстовое, 255	Муниципальный район/округ, в котором расположен ветровал (или его центроид)

Имя поля	Тип, длина поля	Описание
place	Текстовое, 255	Ближайший к ветровалу населенный пункт и расстояние до него
station	Текстовое, 25	Наименование ближайшей метеостанции*
WMOID	Целочисленное	WMO ID ближайшей метеостанции*
path	Десятичное	Длина ветровала, км
width_aver	Десятичное	Средняя ширина ветровала с исключением разрывов, м
width_max	Десятичное	Максимальная ширина ветровала с исключением разрывов, м
direction	Текстовое, 10	Направление движения ветровала по 16 румбам
F-Scale	Текстовое, 10	Интенсивность смерча по шкале Фуджита (только для смерчевых ветровалов). При наличии данных о разрушениях в населенных пунктах определяется непосредственно по разрушениям, в противном случае – по длине и ширине ветровала на основе методики (Shikhov, Chernokulsky, 2018)
gust	Целочисленное	Максимальный порыв ветра на метеостанции, м/с
gust_time	Текстовое, 10	Время по ВСВ, когда наблюдался этот порыв ветра
info	Текстовое, 255	Дополнительная информации о явлении или ущербе от него
URL	Текстовое, 255	Ссылка на источник дополнительной информации
video	Текстовое, 10	Наличие или отсутствие видеозаписи данного явления
reanalysis	Текстовое, 10	Наличие или отсутствие данных реанализа по данному явлению
HRV	Текстовое, 10	Наличие или отсутствие снимков Meteosat в канале высокого разрешения (HRV) по данному явлению
CTT	Текстовое, 10	Наличие или отсутствие снимков Meteosat в тепловом канале по данному явлению

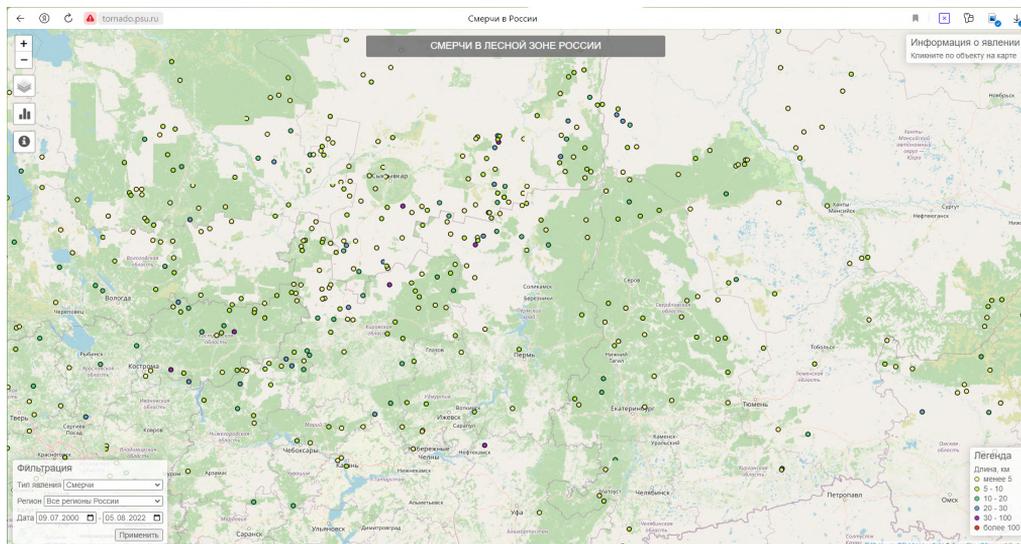
Картографические анимации развития МКС, с которыми связаны шквалы или смерчи, созданы для 220 ветровалов, произошедших в период с 2006 по 2022 гг. на основе снимков со спутников Meteosat (радиометра SEVIRI), для двух случаев также использованы данные японского геостационарного спутника Himawari-8. Анимации имеют временное разрешение 15 мин., как и исходные изображения. Для ветровалов, произошедших в светлое время суток, подготовлены анимации на основе RGB-комбинации канала высокого разрешения HRV и теплового канала, а также температуры верхней границы облаков (ВГО). Для ветровалов, произошедших в темное время суток, доступна только анимация температуры ВГО. Этапы обработки снимков радиометра SEVIRI для создания таких анимаций описаны в разделе 4.2.

Кроме того, для 116 ветровалов на сервисе доступны видеозаписи шквала или смерча, вызвавшего ветровал и его последствий, либо видеосюжеты, характеризующие данное явление и/или его последствия.

Основными компонентами картографического веб-сервиса «Смерчи в лесной зоне России» являются вышеописанная база данных, картографический сервер для публикации пространственных данных (Geoserver) и веб-приложение «Смерчи в России». База данных находится под управлением СУБД PostgreSQL с установленным расширением PostGIS, редактирование производится средствами ГИС-пакета QGIS. Веб-приложение «Смерчи в России» разработано с помощью JavaScript библиотеки Leaflet. Для отображения векторных полигональных объектов используется технология создания векторных тайлов.

Пользовательский интерфейс картографического веб-сервиса содержит интерактивную карту и инструменты для работы с пространственными данными. На сервисе реализованы стандартные инструменты масштабирования, приближения к выбранному объекту, позиционирования с помощью обзорной карты, перехода к полному экстенду, отображение географических координат положения курсора.

Основным тематическим набором данных на сервисе является слой, содержащий векторные контуры ветровалов, которые при мелкомасштабном отображении заменяются точечными объектами – их центроидами. При идентификации ветровалов пользователь получает доступ к атрибутивной информации о выбранном случае (табл. 3.18), а также вышеперечисленным дополнительным данным. Ветровалы разделены на две группы – смерчевые и прочие. Выбор данных для отображения доступен в меню Фильтрация в нижнем левом углу карты (рис. 3.24). Для изменения временного диапазона отображаемых данных создана шкала времени в нижней части окна карты.



**Рис. 3.24.** Стартовая страница картографического сервиса «Смерчи в лесной зоне России»

Для отображения на карте различных качественных и количественных характеристик ветровалов (длины, средней ширины, точности определения времени, интенсивности смерча по шкале Фуджита) разработана легенда. Она позволяет выбирать различные цветовые шкалы и способ отображения ветровалов по одной из перечисленных атрибутивных характеристик. По умолчанию на сервисе отображаются смерчевые ветровалы как точечные объекты с заданной цветовой шкалой по расчетной интенсивности смерча по шкале Фуджита (Fujita, 1981). Также доступна возможность выбора ветровалов в пределах одного субъекта РФ.

По умолчанию ветровалы отображаются точечными символами вне зависимости от их протяженности. При увеличении масштаба карты вместо точек отображаются полигоны, что позволяет рассмотреть ветровал детально и оценить характер повреждения лесного покрова. Для этого в качестве базовой карты может быть выбрана одна из подложек на базе космических снимков высокого разрешения – ArcGIS Imagery, Google Maps или Here Maps (рис. 3.25).

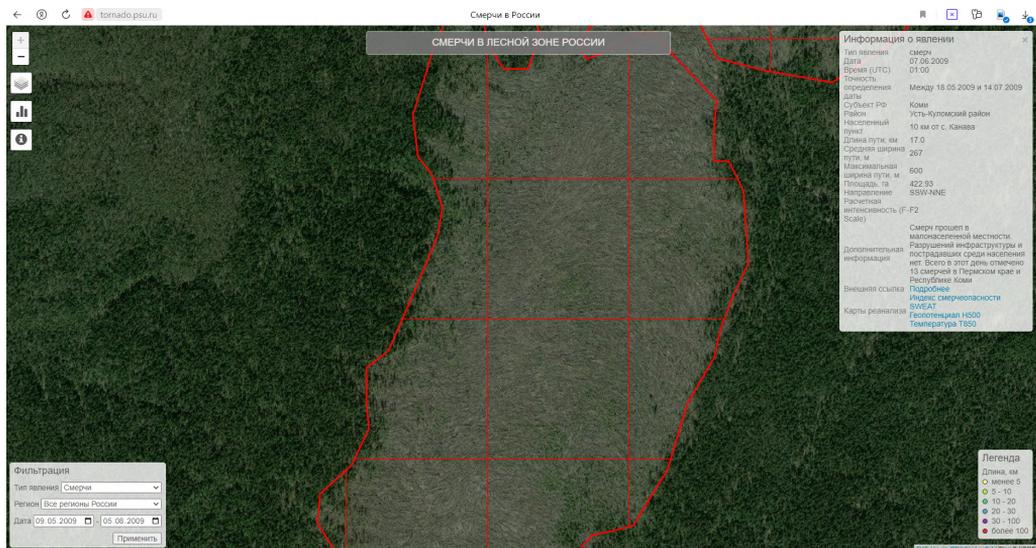


Рис. 3.25. Просмотр атрибутивных характеристик ветровала и его отображение на снимке высокого пространственного разрешения.

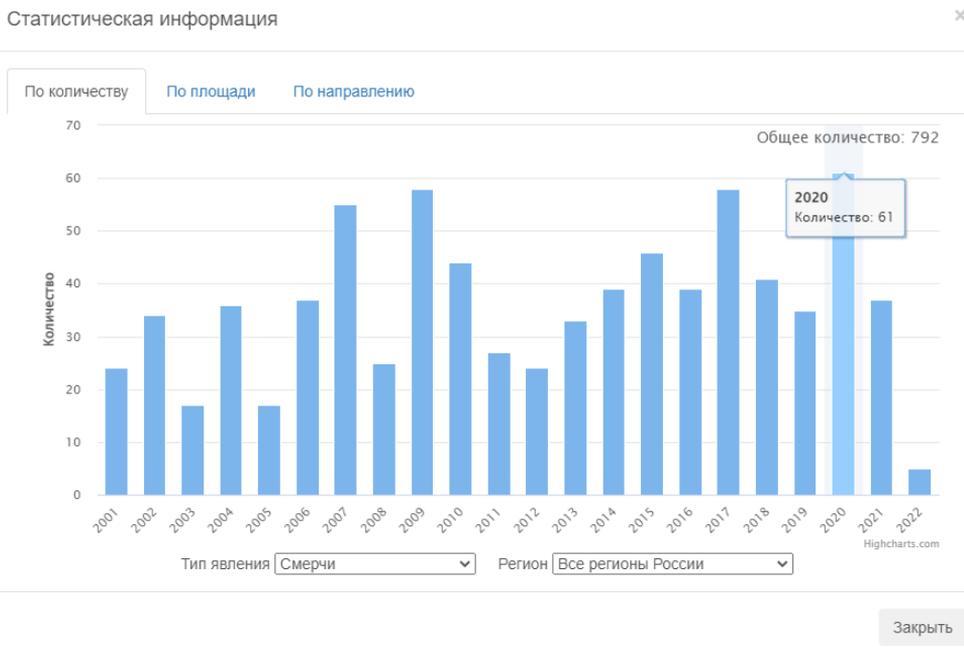
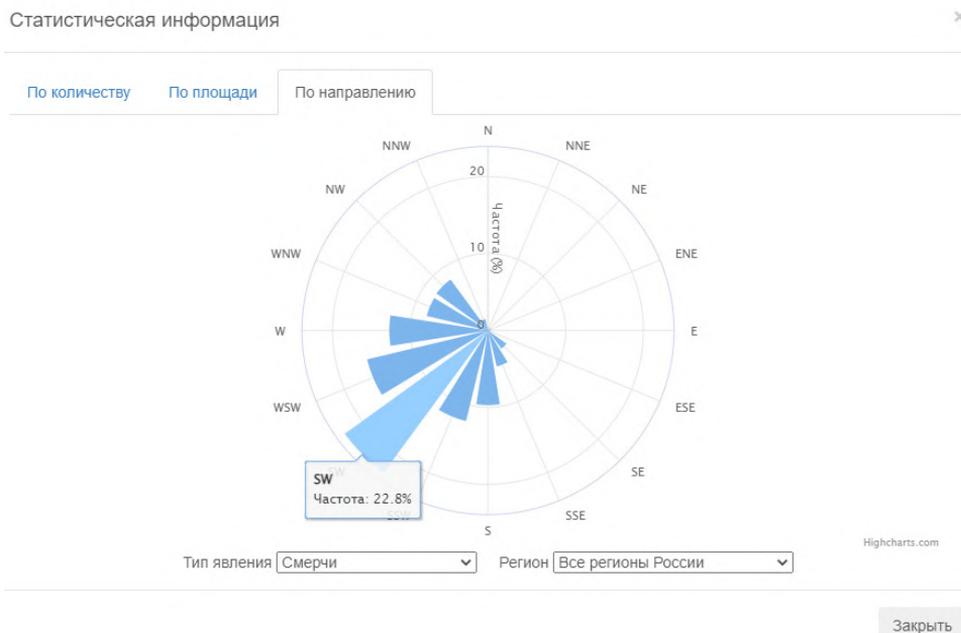


Рис. 3.26. Отображение количества случаев смерчевых ветровалов по годам.



**Рис. 3.27.** Отображение распределения случаев смерчей по направлению движения.

Также на сервисе реализована визуализация качественных и количественных характеристик ветровалов в виде интерактивных графиков и диаграмм. Реализовано построение диаграмм по таким показателям, как количество ветровалов (рис. 3.26), площадь ветровалов, направление (рис. 3.27), в пределах всей территории России или отдельно взятого субъекта РФ, а также за весь интервал времени или за конкретный год.

Базаданных, опубликованная на сервисе, включает 1440 ветровалов за 2000–2022 гг., из которых 792 вызваны смерчами и 648 – иными метеорологическими явлениями. Используются те же пороги минимальной площади ветровалов, что и в основной базе (5 га – для смерчевых и 25 га – для прочих ветровалов). Данные за 2021–2022 г. актуализируются по мере обнаружения новых случаев. Данные о смерчевых ветровалах стали важнейшим источником информации для изучения климатологии смерчей в России (Chernokulsky et al., 2020a, Чернокульский и др., 2021).

Помимо геометрических характеристик ветровалов (табл. 3.18) для каждого

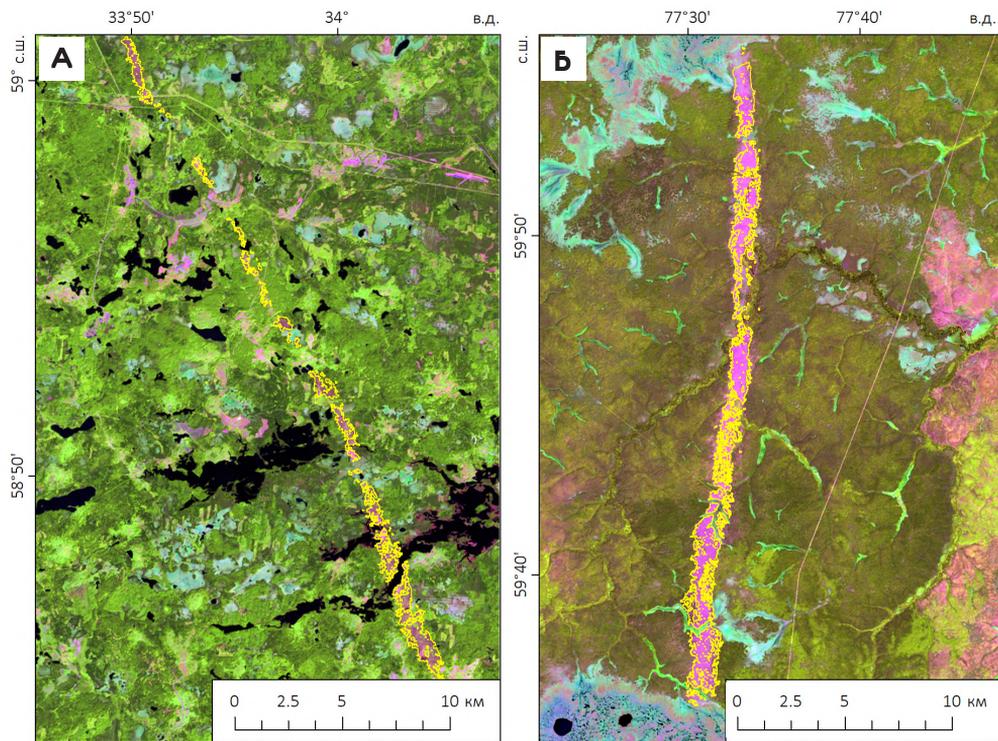
случая смерчей в базе данных приведена также интенсивность по шкале Фуджита (Fujita, 1981).

Однако она может быть определена напрямую только в том случае, если смерч вызвал разрушения зданий и/или объектов инфраструктуры, и эти разрушения были задокументированы. Для подавляющего большинства смерчей, выявленных по данным о ветровалах, такая информация отсутствует. Для таких случаев оценивалась минимальная вероятная интенсивность (с 90% вероятностью) на основе данных о протяженности и максимальной ширине их трека. Изначально методика такой оценки была разработана для территории США (Brooks, 2004), затем она была адаптирована для выборки смерчевых ветровалов в лесной зоне России (Shikhov, Chernokulsky, 2018).

Большинство смерчей имеет минимальную расчетную интенсивность F1 или F2. За 2001–2022 гг. на основе данных о ветровалах выявлено 7 случаев сильных смерчей, с минимальной вероятной интенсивностью  $\geq F3$  (табл. 3.19). По протяженности и ширине трека все они сопоставимы с Ивановским смерчем 09.06.1984 г. (Chernokulsky, Shikhov, 2020). За период 1986–2000 гг. на основе данных о ветровалах на ЕТР был выявлен еще один смерч с минимальной возможной интенсивностью  $\geq F3$ . Все эти смерчи прошли над малонаселенной местностью и не вызвали значительного материального ущерба, за исключением случая 12.06.2010 г.

Еще для 4-х смерчей, вызвавших ветровалы, интенсивность  $\geq F3$  была определена на основе анализа вызванных ими разрушений в населенных пунктах. В отличие от первой группы, эти смерчи вызвали масштабный ущерб и в трех случаях привели к гибели людей. Отметим, что для смерча 18.06.2017 г. в Курганской области в районе дер. Малое Песьяново интенсивность была оценена как F4 на основе наземных фотографий разрушений (спутниковый снимок вызванного им ветровала приведен в разделе 2.1). В настоящее время этот смерч считается самым сильным в России в XXI в. (Chernokulsky et al., 2020б).

В 9 из 12 случаев максимальная ширина ветровала, вызванного сильными смерчами (F3-F4) превышала 1000 м, при этом длина трека изменяется в широких пределах (от 9,8 до 80 км). На ЕТР выявлены два случая с длиной трека свыше 75 км (24.07.1993 и 07.08.2012), в Сибири – один подобный случай в 2001 г. (рис. 3.28).



**Рис. 3.28.** Ветровалы от смерчей с интенсивностью  $\geq F3$  24.07.1993 г. в Новгородской области (а) и в августе 2001 г. в Томской области (б)

Таблица 3.19

Случаи ветровалов, вызванных смерчами с интенсивностью  $\geq F3$  по шкале Фуджита на территории России за 2001–2021 гг.

Дата (диапазон дат)	Координаты (начало трека)	Координаты (конец трека)	Длина (км), максимальная ширина (м) и площадь (км <sup>2</sup> ) ветровала	Способ определения интенсивности
24.07.1993	58.582° с.ш. 34,152° в.д.	59.223° с.ш. 33,667° в.д.	76,1/1055/17,96	По длине и ширине ветровала на основе методики (Shikhov, Chernokulsky, 2018)
Между 07.08.2001 и 17.09.2001	77.42° в.д. 59.47° с.ш.	60.100° с.ш. 77.548° в.д.	70/1550/34,31*	
26.06.2008	61.963° с.ш. 46.254° в.д.	62.113° с.ш. 46,152° в.д.	23,0/1813/14,62	
07.06.2009	60.196° с.ш. 54,045° в.д.	60.544° с.ш. 54,384° в.д.	50/1007/12,17*	
12.06.2010	57.936° с.ш. 41,433° в.д.	57.691° с.ш. 42,652° в.д.	66,6/2031/30,42**	
Между 25.05.2012 и 22.06.2012	59.059° с.ш. 48,950° в.д.	59.172° с.ш. 49,308° в.д.	20,0/1359/9,87	
07.08.2012	59.561° с. ш. 34,696° в.д.	60.178° с.ш. 35,416° в.д.	78,9/1126/11,92	
17.06.2013	59.569° с.ш. 50,379° в.д.	59.573° с.ш. 50,565° в.д.	9,8/1708/6,21	
29.08.2014	56.016° с.ш. 54,040° в.д.	56.200° с.ш. 54.825° в.д.	31,9/686/1,35	По разрушениям в с. Кариево, г. Янаул (Chernokulsky et al., 2015)
13.07.2016	55.575° с.ш. 35,862° в.д.	55.670° с.ш. 36,612° в.д.	45,2/873/5,1	По разрушениям в пос. Колюбакино (Чернокульский и др., 2021)
18.06.2017	55.515° с.ш. 66,633° в.д.	55.766° с.ш. 66,550° в.д.	20,3/1750/2,34	По разрушениям в дер. Малое Песьяново (Chernokulsky et al., 2020b)

Дата (диапазон дат)	Координаты (начало трека)	Координаты (конец трека)	Длина (км), максимальная ширина (м) и площадь (км <sup>2</sup> ) ветровала	Способ определения интенсивности
02.08.2021	55.635° с.ш. 32,216° в.д.	56.685° с.ш. 32,296° в.д.	7,5/497/1,11	По разрушениям в г. Андреаполь

*Примечание.* \*Ветровал возможно вызван несколькими последовательными смерчами.

Приведена оценка общей длины, средней ширины и площади.

\*\*Часть ветровала вызвана шквалом, а не смерчем.

### **Мониторинг крупных ветровалов для актуализации данных на картографическом веб-сервисе**

С момента создания картографического веб-сервиса «Смерчи в лесной зоне России», одной из его задач стала оперативная публикация данных о крупных ветровалах. Поскольку данные GFC обновляются с существенной задержкой, ключевым инструментом для оперативного картографирования ветровалов стал сбор информации о случаях сильных шквалов и смерчей через все доступные источники, с последующей оценкой вызванных ими ветровалов по снимкам Sentinel-2. Оперативная информация о ветровалах практически значима в связи с высоким риском размножения стволовых вредителей на ветровалах и необходимостью проведения защитных мероприятий (Крылов, Владимирова, 2011). Первая попытка оперативного картографирования крупных ветровалов на ЕТР по спутниковым данным Landsat была предпринята после катастрофических ветровалов летом 2010 г. (Крылов и др., 2012). В последующие годы подобные работы в масштабах всей ЕТР не проводились, несмотря на то, что была создана предназначенная для этих целей информационная система «Вега-Лесопатолог» (Уваров и др., 2012).

Работа по оперативному сбору данных о крупных ветровалах в лесной зоне ЕТР и их публикации на сервисе «Смерчи в лесной зоне России» была начата в 2017 г., когда в лесной зоне ЕТР было зафиксировано несколько случаев сильных шквалов и смерчей. Работа ведется в три этапа.

*На первом этапе* производится сбор информации по данным из социальных сетей и СМИ о случаях ветровалов (фотографии, видеозаписи с геолокацией), а также о случаях сильных шквалов и смерчей, способных вызвать

ветровал. На этом этапе также привлекаются данные метеостанций. Наиболее информативными источниками являются фотографии и видеозаписи очевидцев явлений (для уточнения деталей проводился также опрос очевидцев), а также некоторые профессиональные сообщества в социальных сетях (см. напр. Центр защиты леса... 2017).

*На втором этапе* для выделенных областей интереса производится подбор разновременных снимков Sentinel-2 и Landsat-8 в интернет-каталогах и их анализ с целью поиска ветровалов. Анализ выполняется по методике на основе разности вегетационного индекса NDII в пределах лесопокрытой территории (см. подробнее п. 2.3). При этом использовались ближайšie к дате события снимки. Небольшие ветровалы с заранее известными координатами оцифровывались вручную. Для выделенных ветровалов также по методике, описанной в п. 2.3, определялась дата и причина возникновения. Однако дата, как правило, была известна уже на этапе обнаружения ветровала из других источников информации. Учитывая тот факт, что ветровалы часто имеют последовательное расположение (см. п. 2.3), также анализировались снимки с метеорологических спутников Meteosat-8, по которым определялось направление движения облачной системы (МКС), с которой был связан ветровал, стадии ее развития. При необходимости производился подбор дополнительных снимков Sentinel-2 и Landsat-8 вдоль трека движения МКС. Это позволило в ряде случаев обнаружить ранее неизвестные ветровалы. В дальнейшем определяются геометрические параметры ветровалов и производится заполнение базы данных картографического веб-сервиса.

Возможность оперативного обнаружения ветровалов определяется погодными условиями и частотой получения безоблачных снимков. В частности, оперативность обнаружения снижается для ветровалов, произошедших в конце летнего сезона, в связи с характерным для этого периода увеличением облачности. Тем не менее, в 2017 г. на основе вышеописанной схемы мониторинга к сентябрю были получены данные о ветровалах от шести крупных штормовых событий. В 2020-2022 гг. ряд крупных ветровалов на ЕТР были выделены в ходе мониторинга за 1-5 недель после события. В дальнейшем по мере появления новых снимков Sentinel-2, или после актуализации данных GFC были обнаружены новые ветровалы, связанные с этими же событиями (табл. 3.20). В результате итоговая площадь ветровалов оказалась существенно больше первоначально оцененной. Крупнейшие ветровалы, выделенные в результате оперативного мониторинга, связаны с долгоживущими шквалами 15.05.2021 г. на ЕТР и 23.07.2022 в Иркутской области.

Таблица 3.20

Характеристики оперативности обнаружения и публикации данных о некоторых крупных ветровалах в 2020–2022 гг.

<b>Дата штормового события</b>	<b>Дата ближайшего безоблачного снимка ветровала</b>	<b>Дата первой публикации данных на сервисе</b>	<b>Площадь ветровала (га), вызванного штормовым событием (первоначальная/ итоговая оценка)</b>
10.06.2020	17.06.2020	14.07.2020	217/217
26.06.2020	30.06.2020	14.07.2020	54/80
27.06.2020	08.07.2020	14.07.2020	1450/1922
08.07.2020	20.07.2020	22.07.2020	5533/5711
09.07.2020	20.07.2020	14.08.2020	130/227
14.07.2020	06.08.2020	14.08.2020	384/609
16.07.2020	27.07.2020	14.08.2020	332/625
30.07.2020	04.08.2020	14.08.2020	141/141
15.05.2021	20.05.2021	10.01.2022	15555/-
27.06.2021	01.07.2021	17.07.2021	857/-
02.08.2021	28.08.2021	31.08.2021	669/-
04.08.2021	12.08.2021	16.08.2021	550/-
12.05.2022	19.06.2022	14.07.2022	1243/-
26.06.2022	29.06.2022	14.07.2022	2587/-
11.07.2022	05.08.2022	09.08.2022	2571/-
23.07.2022	11.08.2022	30.09.2022	24393/-

Ограничением методики актуализации данных о ветровалах является привязка к внешним источникам данных – сообщениям о ветровалах или о сильных шквалах и смерчах. При этом пропускаются крупные ветровалы в труднодоступных и малонаселенных районах. Актуализация данных о них происходит на основе продукта GFC, т.е. с задержкой в 9–12 месяцев.

## ГЛАВА 4

# УСЛОВИЯ ВОЗНИКНОВЕНИЯ ШКВАЛОВ И СМЕРЧЕЙ, ВЫЗЫВАЮЩИХ ВЕТРОВАЛЫ

### 4.1. Связь шквалов и смерчей, вызывающих ветровалы, с некоторыми макроциркуляционными характеристиками

Согласно классификации (Orlanski, 1975), шквалы и смерчи, а также генерирующие их МКС или отдельные кучево-дождевые облака, относятся к явлениям мезомасштаба (от мезо- $\alpha$  до мезо- $\gamma$ , в зависимости от площади охвата и продолжительности их существования), а некоторые смерчи могут рассматриваться и как явление микромасштаба (Калинин, 2001). Поэтому основное внимание в данной главе уделено именно мезомасштабным процессам. Однако эти процессы возникают в определенных синоптических условиях, которые, в свою очередь, связаны с макроциркуляционными процессами. В настоящем разделе оценивается связь их возникновения с некоторыми характеристиками общей циркуляции атмосферы (ОЦА).

Параметрами ОЦА служат индексы зональной и меридиональной циркуляции А.Л. Каца (далее – индексы Каца), индексы Южного и Североатлантического колебаний, момент импульса зональных ветров атмосферы, параметры центров действия атмосферы, число дней с блокирующими антициклонами, координаты, давление и геопотенциал в их центре, параметры планетарной высотной фронтальной зоны, положение климатических фронтов (Климат России, 2001). Из них наибольший интерес с точки зрения наличия возможных связей с возникновением шквалов и смерчей представляют индексы Каца, индексы арктической осцилляции и северо-атлантического колебания, которые характеризуют макропроцессы, существенно влияющие на характер погоды в исследуемом регионе.

#### Связь случаев шквалов и смерчей на ЕТР с индексами циркуляции Каца

Индексы Каца представляют собой способ количественной оценки интенсивности зональной и меридиональной составляющих циркуляции атмосферы (Кац, 1960). Ежедневные данные о значениях индексов

Каца предоставляются Гидрометцентром России с июля 2005 г. Индексы рассчитываются в пределах трех долготных секторов и для полушария в целом для широтной зоны 35–70° с.ш. и отдельно по северной и южной подзонам (35–50° и 50–70° с.ш.). Также часто используется показатель меридиональности  $I_0$  – отношение меридионального индекса Каца к зональному. Если  $I_0 \geq 0,75$ , то процесс относят к меридиональному типу, если  $I_0 < 0,75$ , то процесс зональный.

В качестве исходных данных использовались суточные значения индексов циркуляции Каца, рассчитанные за период с июля 2005 по декабрь 2020 гг. Далее рассматривались только значения индексов по сектору I (40° з.д. – 100° в.д.), к которому относится ЕТР, и по полушарию в целом. Поскольку свыше 99% случаев шквалов и смерчей, вызывающих ветровалы, отмечались в период между 15 мая и 15 сентября, анализировались значения индексов именно за этот период. Рассмотрены значения индексов за даты, когда наблюдались ветровалы, в сравнении со средними и медианными значениями (нормой) для периода 15 мая – 15 сентября (2005–2020 гг). Массив данных за этот период включает по 1979 значений каждого индекса. Для случаев с ветровалами были сформированы три выборки значений индексов: за все даты со шквалами и смерчами, вызвавшими ветровалы (104 дня), за даты со смерчами (66 дней) и с крупными ветровалами  $S > 5 \text{ км}^2$  (30 дней).

Отдельно рассматриваются периоды, в течение которых наблюдались серии шквалов и смерчей, вызвавших ветровалы на ЕТР (далее – серии ветровалов). Выделено 6 таких периодов: 3–16 июня 2009 г., 22–29 июля 2010 г., 13–17 августа 2014 г., 30 июля – 15 августа 2016 г., 30 июля – 11 августа 2017 г. и 8–16 июля 2020 г. В каждом из этих периодов наблюдалось как минимум по 4 различных штормовых события, вызвавших ветровалы. Такие серии штормовых событий были связаны с общим макросиноптическим процессом, например в июне 2009 г. – с влиянием передней части высотной ложбины с юго-западными воздушными потоками над ЕТР, а в июле 2010 и 2020 гг. – с влиянием западной периферии блокирующего антициклона.

Полученные выборки значений индексов сравнивались со средними и медианными значениями за весь рассматриваемый период. Для выявления различий и оценки их статистической значимости использован непараметрический тест Манна-Уитни и критерий Смирнова для проверки гипотезы об однородности двух эмпирических законов распределения (табл. 4.1). Расчеты выполнены в программном пакете STATISTICA 10.

Таблица 4.1

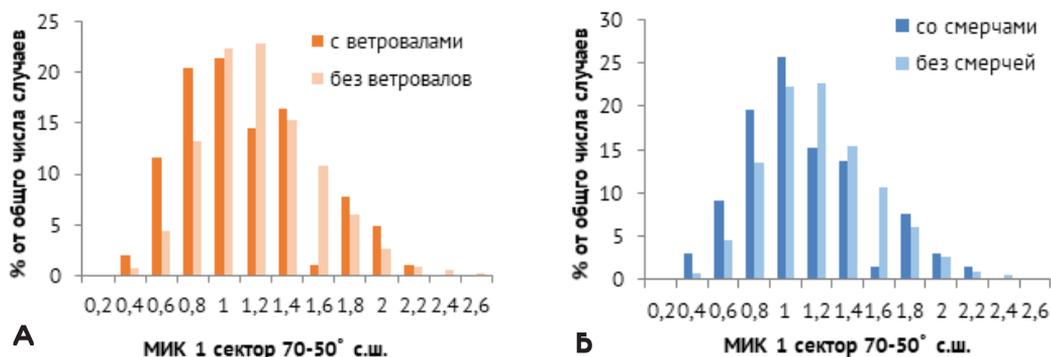
Средние (числитель) и медианные (знаменатель) значения индексов циркуляции Каца за период 15 мая – 15 сентября (2005–2020 гг.), а также для случаев с ветровалами, смерчами, крупными ветровалами и сериями ветровалов за этот же период

Выборка значений	*ЗИК I сектор 70-50° с.ш.	ЗИК I сектор 50-35° с.ш.	ЗИК I сектор 70-35° с.ш.	ЗИК полушарие 70-50° с.ш.	ЗИК полушарие 50-35° с.ш.	ЗИК полушарие 70-35° с.ш.	*МИК I сектор 70-50° с.ш.	МИК I сектор 50-35° с.ш.	МИК I сектор 70-35° с.ш.	МИК полушарие 70-50° с.ш.	МИК полушарие 50-35° с.ш.	МИК полушарие 70-35° с.ш.	Показатель меридиональности в секторе 1
Случаи с ветровалами	1,00/ 0,96	0,95/ 0,92	0,97/ 0,98	0,83/ 0,82	1,12/ 1,11	0,97/ 0,97	1,03/ 0,95	0,91/ 0,93	0,97/ 0,93	1,07/ 1,06	0,90/ 0,90	0,98/ 0,96	1,02/ 0,96
Случаи с крупными ветровалами	0,98/ 0,95	0,93/ 0,89	0,96/ 0,97	0,81/ 0,81	1,12/ 1,10	0,96/ 0,96	0,98/ 0,96	0,91/ 0,90	0,94/ 0,94	1,06/ 1,05	0,91/ 0,91	0,99/ 0,99	1,00/ 0,92

Примечание.

\*ЗИК зональный индекс циркуляции Каца, МИК – меридиональный индекс циркуляции Каца. Выделены значения индексов, статистически значимо отличающиеся от нормы для периода 15 мая – 15 сентября по всем трем вышеперечисленным критериям (уровень значимости 0,01).

Как следует из табл. 4.1, в среднем для случаев с ветровалами значения индексов Каца мало отличаются от нормы для периода 15 мая – 15 сентября, за исключением меридионального индекса Каца (МИК) в секторе I, рассчитанного для подзоны 55–70° с.ш. Этот индекс для случаев с ветровалами смещен в сторону низких значений (рис. 4.1 а). Та же закономерность характерна и для случаев со смерчевыми ветровалами, однако для них статистически значимо ниже оказался и показатель меридиональности  $I_0$ . Действительно, доля случаев со смерчами, которые возникли при зональных процессах ( $I_0 < 0,75$ ), составляет 24%, тогда как для всей выборки индексов за 15 мая – 15 сентября (2005–2020 гг.) зональные процессы отмечались всего в 16,2% случаев.



**Рис. 4.1.** Распределение значений меридионального индекса Каца (рассчитанного для подзоны 70–50° с.ш.) в случаях с ветровалами и без ветровалов (а) и со смерчами и без смерчей (б) за 2005-2020 гг. (период 15 мая – 15 сентября)

Выявленные различия в значениях МИК и  $I_0$  могут объясняться тем, что наибольшие значения этих индексов (попадающие в верхние 5% от всей выборки) часто отмечались в ситуациях с высотным гребнем над западом ЕТР и сопряженной высотной ложбиной над Уралом. При этом наблюдалась адвекция холодного и относительно сухого воздуха с севера и неблагоприятные условия для развития конвекции. В свою очередь, с зональными процессами и низкими значениями МИК (нижние 5% от всей выборки) связаны несколько случаев шквалов и смерчей, вызвавших ветровалы, которые сформировались вдоль широтно-ориентированных фронтальных зон, на фоне адвекции теплого и влажного воздуха с запада или юго-запада.

Для случаев с наиболее крупными ветровалами ( $S > 500$  га) статистически значимые различия не выявлены ни по одному из индексов, что объясняется малым объемом выборки таких событий (30 дней). В то же время для случаев с сериями ветровалов выявлены существенные различия по большинству индексов. Так, ЗИК в секторе I существенно выше среднего в подзоне  $70-50^\circ$  с.ш. и ниже среднего – в подзоне  $50-35^\circ$  с.ш. Это объясняется тем, что шквалы и смерчи связаны с высотными фронтальными зонами и струйными течениями (часто широтно-ориентированными), проходящими над областью  $70-50^\circ$  с.ш. Меридиональный индекс в I секторе для подзоны  $70-50^\circ$  с.ш., а также для зоны  $70-35^\circ$  с.ш. в целом, в случаях с сериями ветровалов оказался ниже среднего, что указывает на менее интенсивную меридиональную циркуляцию, чем в среднем для периода 15 мая – 15 сентября. То же относится и к МИК, рассчитанному для полушария, и к показателю меридиональности  $I_0$ .

Таким образом, проведенный анализ межгрупповых различий показал, что для большинства случаев со шквалами и смерчами характерна менее интенсивная меридиональная циркуляция, чем в среднем в период 15 мая – 15 сентября. Для зональной циркуляции однозначного вывода сделать нельзя, но в случаях с сериями ветровалов значения ЗИК для  $50-70^\circ$  с.ш. оказались статистически значимо выше, а для  $35-50^\circ$  с.ш. – ниже среднего. Эти закономерности могут в перспективе уточняться по мере увеличения выборки случаев ветровалов.

### **Связь частоты возникновения ветровалов с некоторыми крупномасштабными модами атмосферной изменчивости**

Индексы, характеризующие особенности атмосферной циркуляции в северном полушарии (так называемые индексы телеконнекции) существенно влияют на межгодовую изменчивость частоты конвективных явлений на территории Европы. Но количественно оценить их влияние долгое время не удавалось из-за отсутствия многолетних и однородных данных о конвективных явлениях. В последние годы в качестве таковых используются многолетние ряды данных о молниевых разрядах (Piper, Kunz, 2017), или комбинации параметров атмосферы, характеризующие вероятность развития гроз (Piper et al., 2019). С некоторыми допущениями (учитывая неоднородность ряда) такой анализ может быть выполнен и на основе многолетних данных о ветровалах.

В настоящей работе рассмотрены зависимости ежемесячного числа случаев и площади ветровалов от значений пяти индексов телеконнекции – североатлантического колебания (NAO), арктической осцилляции (AO), индекса

Восточной Атлантики, колебания Восточная Атлантика – Западная Россия (EA-WR) и индекса Скандинавии (SCAND). Способы расчета перечисленных индексов, а также их влияние на синоптические процессы и погодные условия в Европе и в западной части России рассмотрены в работах (Переведенцев и др., 2013; Бардин, Полонский, 2005).

Для ЕТР индексы NAO и АО более информативны в холодный период, а летом диапазон их изменчивости значительно меньше, и связь погодных условий со значениями индексов прослеживается хуже (Переведенцев и др., 2013). Индекс EA-WR считается информативным в течение всего года. Зависимости условий развития конвекции над Европой от значений перечисленных индексов были рассмотрены в работах (Piper, Kunz, 2017; Piper et al., 2019). В частности, выявлено статистически значимое увеличение повторяемости условий, благоприятных для развития конвекции, при положительной фазе индексов NAO и SCAND.

Среднемесячные значения индексов получены с информационного ресурса (NOAA CPC, 2021). Для оценки связи значений индексов с количеством и площадью ветровалов были рассмотрены летние месяцы за период 1986-2020 гг., а также отдельно 2004-2020 гг. (данные за этот период можно считать более однородными, чем весь ряд наблюдений за ветровалами по ЕТР). Таким образом, ряд включает 106 среднемесячных значений индексов и соответствующие им месячные данные о количестве и площади ветровалов на ЕТР (за 2004-2020 гг. – 51 значение). На их основе рассчитаны коэффициенты ранговой корреляции Спирмена и Кендалла между значениями индексов и количеством/площадью ветровалов (табл. 4.2).

Таблица 4.2  
Коэффициенты корреляции Спирмена (в числителе) и Кендалла (в знаменателе) между среднемесячными значениями индексов крупномасштабной циркуляции и числом случаев и площадью ветровалов за месяц.

Параметр	NAO	АО	EA-WR	SCAND	EA
Число ветровалов	-0.33/ -0.23	-0.09/ -0.06	-0.43/ -0/31	-0.17/ -0.12	0.23/ 0.17
Площадь ветровалов	-0.33/ -0.23	-0.05/ -0.04	-0.39/ -0.28	-0.13/ -0.09	0.10/ 0.07

Выделены статистически значимые корреляции между индексами и характеристиками ветровалов при уровне значимости 0,05.

Для индексов EA-WR и NAO выявлена статистически значимая отрицательная корреляция как с количеством, так и с площадью ветровалов, причем для EA-WR коэффициенты оказались существенно выше, чем для NAO. Корреляция между индексом EA-WR и количеством ветровалов статистически значима также и за сокращенный период 2004-2020 гг.

Интерпретировать данную связь можно следующим образом – при отрицательных значениях EA-WR северная половина ЕТР часто оказывается на северо-западной периферии высотного гребня, что способствует адвекции теплых воздушных масс с высоким влагосодержанием с акватории Черного, Средиземного или Каспийского морей. Это благоприятно для развития глубокой конвекции, сильных шквалов и смерчей (Снитковский, 1987; Chernokulsky et al., 2020a). В свою очередь, при положительной фазе данного индекса ЕТР оказывается под влиянием тыловой части ложбины или восточной периферии гребня, т.е. в зоне адвекции холодного и сухого воздуха, что не способствует развитию глубокой конвекции.

Связь числа случаев и площади ветровалов со значениями NAO статистически значима, но интерпретировать ее сложнее. Если в Западной и Центральной Европе частота конвективных явлений имеет положительную связь с NAO, то на ЕТР – отрицательную. В частности, положительные значения NAO наблюдались в случаях с формированием долгоживущих блокингов над Восточной Европой в июле 1997, 2002, 2014 гг., когда на ЕТР наблюдались минимумы по числу случаев ветровалов, что может объяснить выявленную статистическую значимую корреляцию.

Также отметим, что среднемесячные значения индексов могут быть недостаточно информативны. Например в июне 2009 г. наблюдалось наибольшее количество ветровалов за месяц (свыше 60 случаев), но все они произошли в период 3-19 июня, а в третьей декаде июня характер циркуляции существенно изменился, что повлияло на значения индексов циркуляции по итогам месяца.

### **Связь шквалов и смерчей с блокирующими антициклонами**

Блокирующие антициклоны (блокинги) являются объектами синоптического масштаба, но могут рассматриваться и в контексте анализа макропроцессов. Согласно классическому определению (Хромов, 1974), блокирующими называются высокие стабилизировавшиеся антициклоны, нарушающие общий западный перенос в средних широтах. Традиционно они определялись как область больших высот поверхности 500 гПа. Количественные критерии блокирования, как правило, основаны на топографии изобарической

поверхности 500 гПа (Шакина и др., 2011). В последние годы внимание научного сообщества к блокирующим процессам в теплый период года усилилось в связи с вызываемыми ими волнами тепла, которые сопровождаются засухами и природными пожарами.

В центральных частях блокирующих антициклонов, возникающих в летний период, глубокая конвекция подавляется за счет нисходящих движений в средней тропосфере. Однако для их западной и иногда для северной периферии характерны благоприятные условия для возникновения долгоживущих мезомасштабных конвективных систем (МКС) со шквалами и смерчами, особенно при наличии струйного течения в средней тропосфере, что обусловлено адвекцией теплого и влажного воздуха с акваторий Средиземного, Черного и Каспийского морей. Связь блокингов и конвективных явлений для территории Западной и Центральной Европы рассмотрена в работе (Mohr et al., 2019).

Так, известные случаи долгоживущих сильных шквалов (деречо), наблюдавшиеся в июле 2002 г. в Германии (Gatzen, 2004) и в Финляндии (Punkka et al., 2006), сформировались на периферии восточноевропейского блокинга. В ряде регионов ЕТР с этим блокингом была связана засуха и лесные пожары (Mokhov, 2011). В свою очередь, два случая деречо на ЕТР, наблюдавшиеся 27 июня и 29 июля 2010 г. и вызвавшие катастрофические ветровалы наблюдались на западной периферии летнего блокинга 2010 г. (Chernokulsky et al., 2022a).

Каталог блокирующих антициклонов, который включает свыше 1600 записей за период с 1968 г. на основе данных реанализа NCEP/NCAR представлен в работе (Lupo et al., 2019). Для каждого блокинга в каталоге приведены даты и время возникновения и разрушения, продолжительность существования, интенсивность и координаты места возникновения.

На основе каталога были выделены блокинги, на периферии которых сформировались шквалы и смерчи, вызвавшие ветровалы. Для этого была проведена фильтрация данных о блокингах по годам и сезону (выбраны случаи за май-сентябрь 1986–2020 гг.), по координатам и по датам возникновения (совпадение дат существования блокинга с датами ветровалов). В результате выявлены 13 блокингов, на периферии которых возникли шквалы и смерчи, вызвавшие ветровалы (табл. 4.3). Также в таблицу добавлен блокинг в мае 2021 г., на периферии которого наблюдался разрушительный шквал 15.05.2021 г. Из 13 выделенных блокингов 11 имели продолжительность жизни больше среднего значения по каталогу (9,0 сут). Пять блокингов относятся к долгоживущим, с продолжительностью существования более 15 сут (Шакина и др., 2011).

Таблица 4.3

Характеристики блокингов и случаев шквалов и смерчей, вызвавших ветровалы, которые наблюдались под влиянием их периферии

Характеристики блокинга			Характеристики ветровалов			
Дата появления	Дата разрушения	Координаты места возникновения	Количество (шквалы/ смерчи/ крупные ветровалы $S > 5 \text{ км}^2$ )	Даты и количество штормовых событий	Общая площадь, $\text{км}^2$	Периферия блокинга, на которой возникли шквалы/Смерчи
20.06.1987	25.06.1987	55° с.ш., 50° в.д.	3 (1/2/1)	2 (20.06.1987)	12,95	NW
09.07.1996	14.07.1996	40° с.ш., 45° в.д.	4 (4/0/3)	1 (12.07.1996)	49,57	NW
05.06.1998	18.06.1998	50° с.ш., 45° в.д.	4 (2/2/1)	1 (15.06.1998)	9,10	W
11.07.2000	25.07.2000	62,5° с.ш., 40° в.д.	3 (1/2/1)	2 (23.07.2000, 25.07.2000)	9,78	W, NW
12.07.2004	24.07.2004	55° с.ш., 50° в.д.	9 (3/6/1)	6 (15.07.2004, 16.07.2004, 17.07.2004)	24,56	W
27.05.2007	15.06.2007	55° с.ш., 20° в.д.	4 (4/0/3)	4 (29.05.2007, 31.05.2007, 01.06.2007)	57,23	E, N, NE, SW
22.06.2010	02.07.2010	65° с.ш., 20° в.д.	5 (5/0/3)	2 (27.06.2010)	504,96	NW

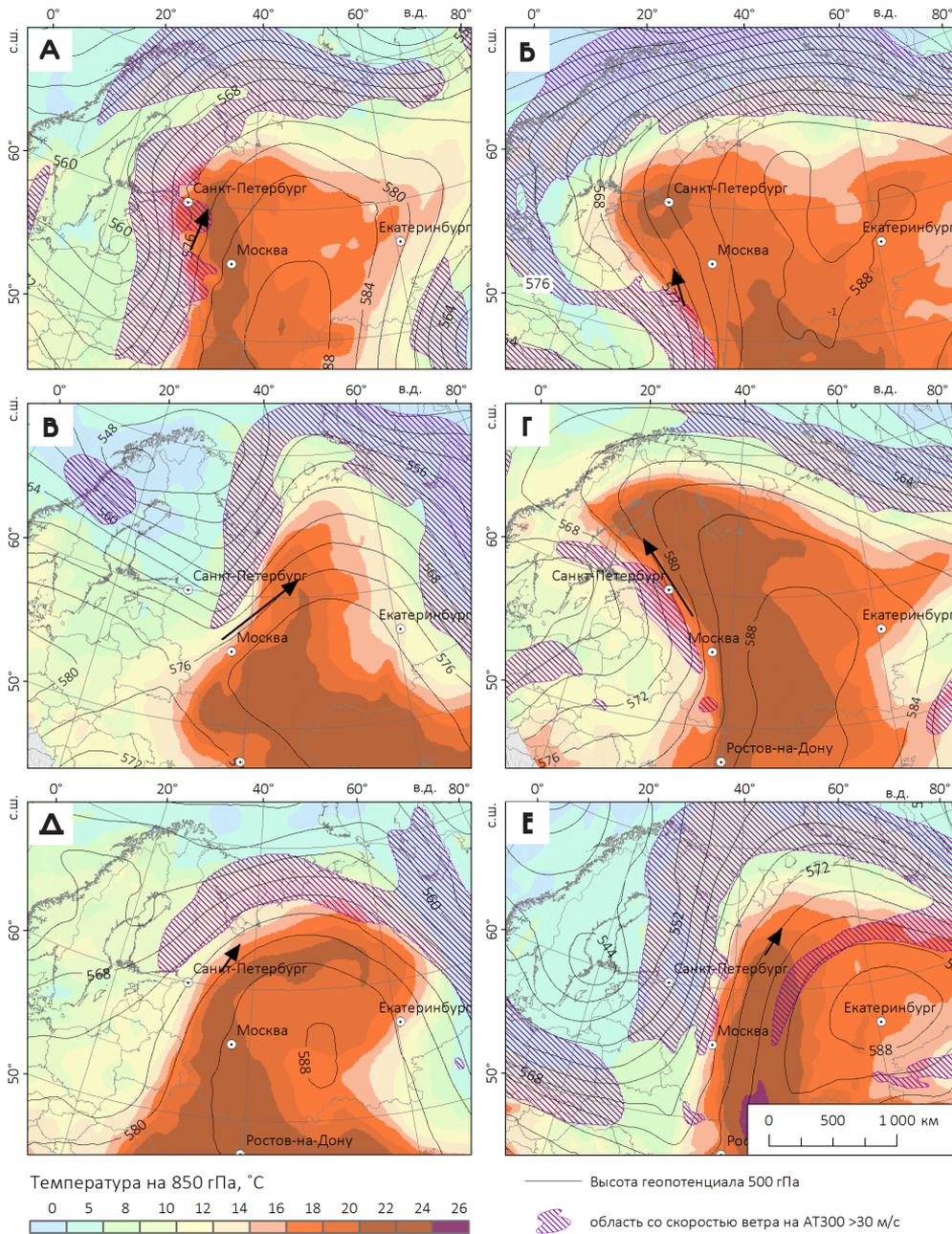
04.07.2010	30.07.2010	55° с.ш., 20° в.д.	8 (7/1/4)	4 (22.07.2010, 23.07.2010, 25.07.2010, 29.07.2010)	646,09	W, NW, N
31.07.2010	16.08.2010	50° с.ш., 45° в.д.	10 (9/1/4)	2 (10.08.2010)	45,65	NW, NE
17.07.2012	03.08.2012	55° с.ш., 70° в.д.	29 (26/3/6)	4 (17.07.2012, 18.07.2012)	212,07	W
11.08.2016	25.08.2016	55° с.ш., 60° в.д.	8 (4/4/0)	4 (15.08.2016)	5,41	W
07.07.2020	19.07.2020	55° с.ш., 50° в.д.	31 (26/5/1)	16 (07.07.2020, 08.07.2020, 09.07.2020, 10.07.2020, 14.07.2020, 15.07.2020, 16.07.2020)	87,20	W, NW
09.05.2021	26.05.2021	60° с.ш., 60° в.д.	16 (8/8/4)	5 (15.05.2021, 20.05.2021, 22.05.2021, 24.05.2021)	164,80	W, NW, N
<b>Итого по ветровалам</b>			134 (102/32/32)	40	1666,2	

Всего с этими блокингами связаны 134 случая ветровалов на ЕТР (102 шкваловых и 32 смерчевых), вызванных 53 разными штормовыми событиями. Реальное число случаев вероятно больше, так как для 43,8% случаев ветровалов на ЕТР дата возникновения неизвестна, и часть этих случаев могла возникнуть на периферии блокингов. Суммарная площадь ветровалов, которые возникли в такой ситуации, за период 1986-2020 гг. составляет 47% от всей известной площади ветровалов на ЕТР.

Все перечисленные блокинги сопровождалась волнами тепла с максимальной температурой воздуха +30...+40°C в их центральных частях и на западной/северной периферии. Наиболее интенсивные волны тепла отмечались в июле 2010 и 2020 гг., а также в мае 2021 г., когда среднесуточная температура воздуха превышала климатическую норму на 10-15°C.

В большинстве случаев блокинги стационарировали над Поволжьем. При этом шквалы и смерчи наблюдались в западных и северных районах ЕТР. Однако имеются и другие варианты расположения блокингов. Так, блокинг в июле 1996 г. располагался в районе Нижней Волги, в июле 2000 г. – над северо-востоком ЕТР, в июле 2012 г. – над Зауральем, в августе 2016 и июле 2020 г. – над Южным Уралом. При этом шквалы и смерчи отмечались в разных районах ЕТР. Различные варианты синоптического положения при возникновении шквалов на периферии блокингов показаны на рис. 4.2. Чаще всего шквалы и смерчи возникали на западной или на северо-западной периферии блокингов, т.е. при южных и юго-западных ветрах в средней тропосфере. В 2007 и 2010 гг. отмечены также случаи шквалов на северо-восточной или юго-западной периферии блокинга.

В выборке ветровалов, связанных с периферией блокингов, 76% приходится на шкваловые, тогда как во всей базе данных 55% случаев составляют смерчевые ветровалы. Таким образом, условия на периферии блокингов более благоприятны для возникновения шквалов, чем для смерчей. Это соответствует ранее выявленным закономерностям для территории Европы (Mohr, 2019). Шквалы на периферии блокингов часто вызывают крупные ветровалы. Если среди всех ветровалов с известными датами на периферии блокингов возникли около 24%, то среди крупных ветровалов ( $S > 500$  га) – 36%. С западной или северо-западной периферией блокингов связаны случаи шквалов, которые нанесли наибольший ущерб для лесного покрова ЕТР – 27.06.2010, 29.07.2010, 18.07.2012 и 15.05.2021 гг.



**Рис. 4.2.** Синоптическое положение в случаях возникновения крупных ветровалов на периферии блокирующих антициклонов: а) 12.07.1996; б) 15.06.1998; в) 27.06.2010; г) 29.07.2010; д) 10.08.2010; е) 08.07.2020.

Если на западной периферии блокингов наблюдаются благоприятные условия для возникновения шквалов и смерчей, то при блокировании над Скандинавией или западными районами ЕТР наоборот, отмечается минимум повторяемости этих явлений. Так, в период блокирования над ЕТР с 7 июля по 7 августа 2014 г. не зафиксировано ни одного ветровала. Подобные процессы отмечались также в июле 2003, июле–августе 2002 и в июле 1997 г. В эти годы число случаев и площадь ветровалов на ЕТР были существенно меньше средних значений.

Таким образом, блокирующие процессы оказывают значительное и разнонаправленное влияние на повторяемость ветровалов в лесной зоне ЕТР, и эта проблема требует дополнительных исследований. Полученные данные о возникновении крупных ветровалов на периферии блокингов также не противоречит приведенному выше выводу о том, что значения индекса меридиональной циркуляции в случаях с ветровалами статистически значимо ниже, чем в среднем за период 15 мая – 15 сентября. Связь с периферией блокингов выявлена, прежде всего, для наиболее крупных ветровалов ( $\geq 500$  га), вызванных шквалами, доля которых в общем числе событий, вызывающих ветровалы, сравнительно невелика. В то же время при анализе индексов зональной и меридиональной циркуляции рассматривались все штормовые события, вызвавшие ветровалы.

#### **4.2. Мезомасштабные процессы, обуславливающие возникновение шквалов и смерчей**

Сильные шквалы и смерчи представляют собой наиболее опасные явления погоды конвективного характера на территории России, которые не только наносят значительный ущерб для лесного покрова, но и часто становятся причиной различных чрезвычайных ситуаций и гибели людей (Бедрицкий и др., 2001; Chernokusky et al., 2020a). Изучению условий их возникновения и разработке методов прогнозирования посвящена обширная литература. До недавнего времени в большинстве работ в России (см. напр. Ананова и др., 2007; Васильев и др., 2009; Константинова, Горбатенко, 2010; Переходцева, 2010, 2011; Алексеева, 2014; Алексеева и др., 2017; Дмитриева, Песков, 2013; Калинин и др., 2017–2019) рассматривались в основном случаи шквалов. Условия возникновения смерчей были изучены в меньшей степени в связи с недостатком информации. Внимание российского научного сообщества привлекали только единичные случаи сильных смерчей, которые проходили

над населенными пунктами и нанесли значительный ущерб (Дмитриева, Песков, 2016; Курганский и др., 2013; Чернокульский и др., 2015; Шихов, Быков, 2015; Новицкий и др., 2016, 2018; Chernokulsky et al., 2020b, Романский и др., 2020). Лишь после публикации новой климатологии смерчей в Северной Евразии (Chernokulsky et al., 2020a) появилась возможность получения данных об условиях возникновения смерчей на обширной выборке случаев.

Среди множества шквалов и смерчей особый интерес с точки зрения условий возникновения представляют наиболее интенсивные и/или охватывающие значительную территорию случаи, поскольку именно с ними связан наибольший ущерб. Однако сформировать такую выборку до недавнего времени было проблематично, поскольку значительная часть случаев шквалов и подавляющее большинство смерчей не фиксируются метеостанциями, а величина ущерба зависит от плотности населения. Для лесной зоны критерием, позволяющим объективно (т.е. независимо от плотности наблюдательной сети и населения) оценить интенсивность шквалов или смерчей, а также размер территории, подвергшейся их воздействию, может быть наличие повреждения лесного покрова – сплошного ветровала, а также его площадь и протяженность.

Таким образом, созданные базы данных о ветровалах в лесной зоне ЕТР и Сибири, описанные в предыдущих главах работы, являются ценнейшим источником информации о случаях шквалов и смерчей для последующего выявления различных закономерностей их возникновения.

Настоящий раздел монографии посвящен диагностике мезомасштабных условий возникновения шквалов и смерчей, выявленных на основе баз данных о ветровалах. В частности, рассмотрены особенности мезомасштабных конвективных облачных систем (конвективных штормов), вызывающих сильные шквалы и смерчи, значения диагностических переменных, характеризующих вертикальный профиль атмосферы (конвективных параметров или индексов неустойчивости), оказывающие существенное влияние на характеристики этих штормов, и взаимосвязи между ними. Для этого совместно проанализированы три набора данных:

- случаи шквалов и смерчей, которые вызвали ветровалы;
- характеристики конвективных штормов, вызвавших эти события, полученные по снимкам со спутников Meteosat радиометром SEVIRI;
- значения диагностических переменных (конвективных параметров атмосферы) в момент возникновения этих случаев шквалов и смерчей, рассчитанные на основе данных реанализа ERA5.

### Ингредиентный подход

В мировой практике диагностики и прогнозирования конвективных опасных явлений погоды (КОЯП), в частности сильных шквалов и смерчей, развивается множество подходов, основанных на использовании и/или комбинировании данных аэрологического зондирования, глобальных и региональных моделей численного прогноза погоды, данных реанализа, спутниковых и радиолокационных наблюдений. Одним из них является ингредиентный подход, который был впервые предложен для прогноза ливневых паводков (Doswell et al., 1996). В рамках данного подхода развитие глубокой конвекции в атмосфере рассматривается как функция нескольких предикторов (ингредиентов). Согласно (Rasmussen, Blanchard, 1998; Brooks et al., 2018), выделяют четыре ингредиента: аномально теплый и влажный воздух в приземном слое (1), триггер, вызывающий восходящие движения у поверхности, которым может быть фронтальный раздел или орография (2), неустойчивая стратификация воздуха (3) и вертикальный сдвиг ветра (4). Для оценки ингредиентов вычисляется ряд диагностических переменных (индексов неустойчивости), которые характеризуют отдельные ингредиенты или их сочетания. В качестве исходной информации для расчета индексов используются данные аэрологического зондирования атмосферы (Rasmussen, Blanchard, 1998; Púčik et al., 2015; Taszarek et al., 2017), данные реанализов (Brooks et al., 2009; Grams et al., 2012; Taszarek et al., 2020b), или оба источника (Gensini et al., 2014; Taszarek et al., 2018, 2020a).

Условием применимости данных аэрологического зондирования является расположение ближайшей станции на расстоянии не более 200–300 км от места возникновения КОЯП по направлению, соответствующему ведущему потоку в средней тропосфере (так называемый метод Proximity Sounding). Однако низкая плотность сети станций радиозондирования (расстояние между соседними станциями до 300–400 км) и большая временная дискретность (два раза в сутки) снижают информативность этих данных. Поэтому в последнее время большинство исследований проводится на основе данных реанализов, пространственное и временное разрешение которых непрерывно растет, что позволяет получать более надежные оценки условий возникновения КОЯП (Taszarek et al., 2020).

В связи с этим большое значение имела публикация в 2020 г. данных реанализанового поколения ERA5, основанного на глобальной численной модели атмосферы Европейского центра среднесрочных прогнозов погоды (Hersbach et al., 2020). Данные ERA5 имеют самое высокое пространственное разрешение

среди других реанализов (30 км), а также большее число вертикальных уровней, что имеет значение при расчете индексов неустойчивости (Taszarek et al., 2020б, 2021). Также важно отметить, что последние исследования, в которых анализируются условия возникновения КОЯП в регионах мира (в частности, в Европе и Северной Америке) были выполнены на основе данных ERA5 (Taszarek et al., 2020б). В рамках настоящей работы также использованы данные этого реанализа.

### **Идентификация и оценка характеристик конвективных штормов по данным с геостационарных метеоспутников**

Смерчи и шквалы, как и другие КОЯП, генерируются отдельными конвективными ячейками или (чаще) мезомасштабными конвективными системами (МКС). В зарубежной литературе также применяется термин «конвективный шторм». Под него подпадает любое кучево-дождевое облако или скопление таких облаков, с которым связана грозовая деятельность, сильные ливневые осадки, град, шквалы, смерчи и резкие изменения температуры воздуха (Royal Meteorological Society, 2020).

Важнейшими инструментами для мониторинга и наукастинга конвективных штормов и связанных с ними КОЯП являются доплеровские метеорологические радиолокаторы (ДМРЛ) и геостационарные метеоспутники, причем в США и Европе более значимым источником данных являются ДМРЛ. Однако на большей части России радиолокационные наблюдения отсутствуют. В результате наблюдения за особенностями верхней границы облаков (ВГО) с геостационарных спутников остаются важным средством диагностики КОЯП.

Для территории Европы и западной части России доступны данные серии спутников Meteosat, оператором которых является Европейская организация по эксплуатации метеорологических спутников EUMETSAT. Спутники Meteosat Second Generation (MSG2) обеспечивают получение данных о температуре и альbedo верхней границы облаков (ВГО) каждые 15 мин, а для территории Европы (включая западную часть ЕТР) – каждые 5 мин с помощью 12-ти канального радиометра SEVIRI (Spinning Enhanced Visible and Infrared Imager). Информация о спектральных каналах данного сенсора приведена в табл. 4.4.

Основным ограничением данных MSG2 для ЕТР долгое время было положение спутников над пересечением экватора и Гринвичского меридиана. В результате качественные данные были доступны только для западных районов ЕТР. Однако с 2016 г. спутник Meteosat-8 был смещен в точку с координатами

0° с.ш. и 41,5° в.д., что обеспечивает покрытие данными для всей ЕТР, Урала и Западной Сибири каждые 15 мин (Klaes, 2017).

Таблица 4.4  
Спектральные каналы прибора SEVIRI/Meteosat-8

Название канала	Длина волн, мкм	Пространственное разрешение в надире, км
VIS 0.6	0,56 – 0,71	3,0
VIS 0.8	0,74 – 0,88	3,0
IR 1.6	1,50 – 1,78	3,0
IR 3.9	3,48 – 4,36	3,0
IR 8.7	8,30 – 9,10	3,0
IR 10.8	9,80 – 11,80	3,0
IR 12.0	11,00 – 13,00	3,0
WV 6.2	5,35 – 7,15	3,0
WV 7.3	6,85 – 7,85	3,0
IR 9.7	9,38 – 9,94	3,0
IR 13.4	12,40 – 14,40	3,0
HRV	0,5 – 0,9	1,0

В России накоплен значительный опыт диагностики КОЯП (включая шквалы и смерчи) по данным спутников Meteosat. Исследования в этом направлении ведутся более 10 лет в НИЦ «Планета» (Bukharov et al., 2008; Волкова, Успенский, 2008). Разработаны пороговые алгоритмы, которые позволяют успешно детектировать зоны ливневых осадков, гроз и града и создавать соответствующие тематические продукты (Волкова и др., 2015). В то же время эти алгоритмы не позволяют выделить особенности структуры верхней границы облаков (ВГО), связанные с мощными восходящими потоками и развитием ОЯ, включая шквалы и смерчи.

Зарубежными исследователями с конца 1970-х гг. решалась задача идентификации потенциально опасных штормов (генерирующих шквалы, смерчи,

крупный град или сильные ливни). Для этого был предложен подход, основанный на поиске особенностей (сигнатур) на ВГО, указывающих на высокий риск развития КОЯП. В частности, в работе (Reynolds, 1980) было впервые показано, что зоны развития КОЯП могут быть идентифицированы по появлению пробоев тропопаузы или Overshooting Tops (OT) – локальных областей с экстремально низкой температурой ВГО ( $T_{\text{вго}}$ ), соответствующих сильным восходящим потокам. В дальнейшем были разработаны алгоритмы автоматического детектирования OT (см. напр. Bedka et al., 2010) и проанализированы связи этих сигнатур со случаями КОЯП на большом массиве данных. Была выявлена статистически значимая корреляция OT сигнатур со случаями крупного града ( $R = 0,52$ ) и шквалов ( $R = 0,53$ ), и значительно более слабая связь со случаями смерчей ( $R = 0,15$ ) (Bedka, 2011).

Также при анализе распределения температуры ВГО у развитых штормов часто обнаруживаются замкнутые кольцевые или незамкнутые U- или V-образные структуры. Иногда они обозначаются аббревиатурой CRCUV (Cold Ring & Cold-U/V), указывающей на возможное единство причин их образования. Эти структуры включают область повышенной радиояркой температуры ( $-50...-55^{\circ}\text{C}$ ) в центре и более холодную область ( $-60^{\circ}\text{C}$  и ниже) на периферии, что вероятно связано с выносом более теплых гидрометеоров из средней части облака к его вершине мощными восходящими потоками. Такие структуры часто соответствуют областям с сильными восходящими потоками, в том числе суперячейковым штормам (Adler et al., 1985; Setvak et al., 2010; Putsay et al., 2011). Помимо сигнатур CRCUV, индикатором КОЯП могут быть также перистые «плюмы» (шлейфы) над наковальной кучево-дождевого облака (Bedka et al., 2018). Роль всех перечисленных сигнатур на ВГО как индикатора КОЯП над территорией России до последнего времени оставалась малоизученной.

В ряде ранее опубликованных работ отмечалась зависимость между значениями конвективных параметров атмосферы и возникновением перечисленных сигнатур на ВГО, наблюдаемых по спутниковым снимкам. В частности, высокая доступная потенциальная энергия неустойчивости (CAPE) необходима для возникновения сильных восходящих потоков, а сильный вертикальный сдвиг ветра имеет решающее значение для формирования долгоживущих восходящих потоков, приводящих возникновению суперячек и дугообразных систем (Kunz et al., 2007; Taszarek et al., 2020б). Однако совместный анализ сигнатур на ВГО и конвективных индексов ранее выполнялся в основном для CAPE и сдвига ветра. При этом другие важные переменные, такие как относительная завихренность (SRH) и композитные параметры (позволяющие

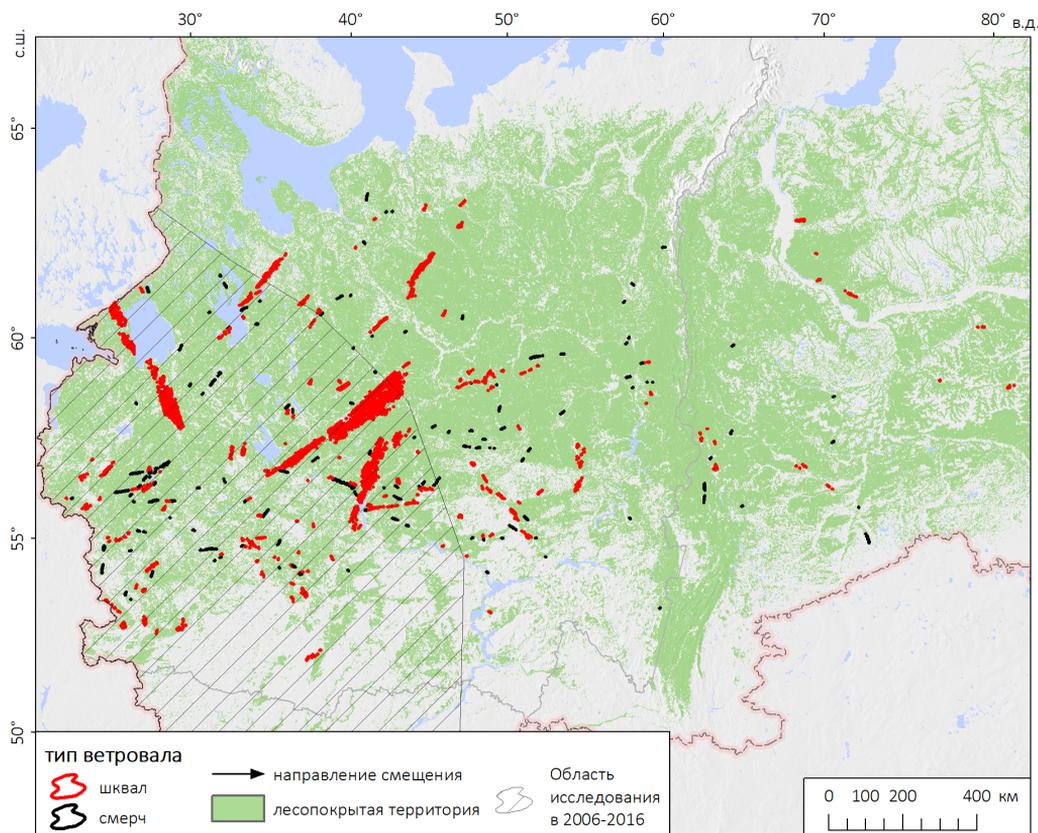
оценить вероятность возникновения мощных конвективных штормов на основе комбинирования более простых параметров), не принимались во внимание. Так, в работе (Bedka, 2011) впервые отмечалось, что сигнатуры пробоя тропопаузы, различимые на снимках, связаны с высокими значениями CAPE. В связи с этим, их появление часто сопровождалось крупным градом, но значительно реже – смерчами. Идея о возможности идентификации случаев крупного града была развита в работе (Punge et al., 2014), в которой на основе данных реанализа ERA-Interim были предложены специфические для случаев града пороги для CAPE и сдвига ветра в слое 0-6 км (DLS). Перистые шлейфы (плюмы) над наковальной кучево-дождевых облаков, наблюдаемые на спутниковых снимках, также связаны с высоким CAPE и сильным сдвигом ветра (Bedka et al., 2018). Для территории России подобные исследования зависимостей между характеристиками конвективных штормов на спутниковых снимках и значениями конвективных параметров ранее не проводились.

#### **Методика определения характеристик конвективных штормов по данным Meteosat/SEVIRI**

Выборка случаев шквалов и смерчей для анализа сформирована на основе вышеописанных баз данных ветровалов на ЕТР и в Сибири, с учетом случаев за 2021 г. Обе базы данных охватывают период, за который доступны снимки Meteosat/SEVIRI (с 2006 г. по настоящее время). В первую очередь были выбраны случаи ветровалов, относящиеся к данному периоду и попадающие в зону покрытия снимками. В период 2006 – 2016 гг. снимки MSG2 были доступны и имели достаточное качество для анализа структуры ВГО только для западной части ЕТР. За этот период были отобраны 165 случаев ветровалов. За период 2017–2021 гг. область охвата снимками MSG2 расширилась до 80° в.д. за счет перемещения спутника Meteosat-8 на 41,5° в.д. (Klaes et al, 2017), что позволило отобрать еще 254 случая для дальнейшего анализа. Затем из сформированной выборки были исключены ветровалы с неизвестными датами возникновения.

Для оставшихся случаев была проведена процедура идентификации конвективных штормов, которые вызвали эти ветровалы, на основе временных рядов снимков Meteosat (98 разных дат в 2006–2021 гг.). Снимки за каждую дату, когда происходили ветровалы, были загружены из каталога (EUMETSAT Eoportals, 2022). Кроме того, анализировалась независимая информация о времени возникновения шквала или смерча на основе данных метеостанций и базы данных ESWD. Был исключен также ряд случаев с известными датами, но неизвестным временем события (когда не установлено, какой именно

конвективный шторм вызвал шквал или смерч). В результате исходная выборка из 419 ветровалов, сократилась до 281 события, включая 143 случая шквалов и 138 смерчей (рис. 4.3). Из них на период до 2017 г. приходится 82 случая, а на 2017 – 2021 гг. – 199 случаев.



**Рис. 4.3.** Регион исследования и анализируемая выборка ветровалов

Для выявления наиболее часто встречающихся сигнатур восходящих потоков на спутниковых снимках, таких как OT (Bedka et al., 2010) и CRCUV (Brunner et al., 2007; Setvak et al., 2010), наиболее информативны данные в канале высокого разрешения в видимом диапазоне (HRV), а также IR10.8 (тепловой канал с длиной волны 10.8 мкм). Их пространственное разрешение для изучаемой территории составляет около 1,2 км и 3,5 км соответственно, а временное разрешение – 15 минут.

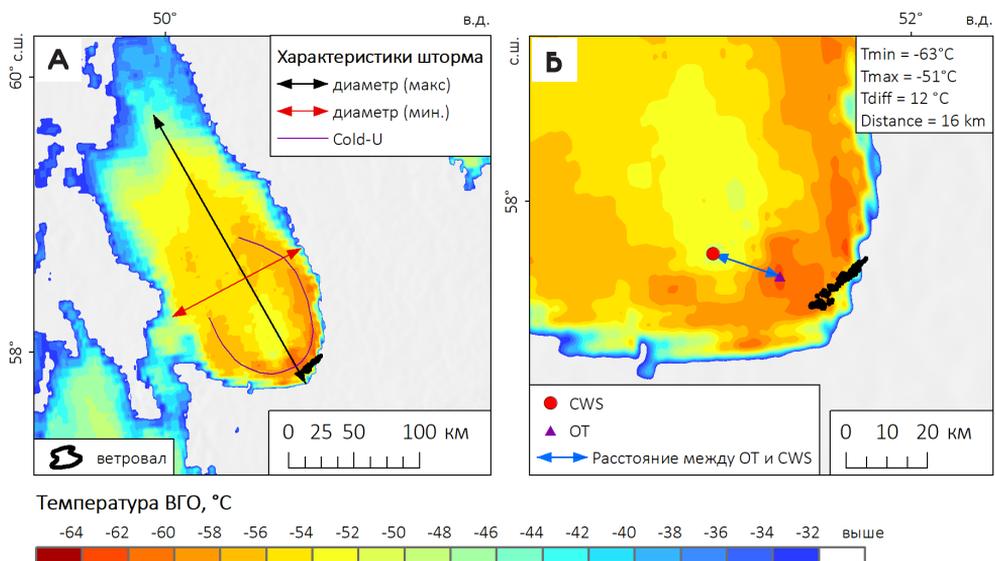
Предобработка данных радиометра SEVIRI, в частности извлечение по границам исследуемой области, расчет яркостной температуры и альбедо и последующая конвертация в формат Geotiff, была выполнена с помощью пакета программ MSG Data Retriever. Затем изображения в тепловом канале, а также в RGB-комбинации каналов HRV и IR10.8, известной как HRVcloud (Kerkmann et al., 2006) были сопоставлены в программном пакете ArcGIS с ранее выбранными участками ветровалов. Снимки за ночной период были получены только в тепловом канале.

На следующем этапе на основе временных рядов снимков радиометра SEVIRI и ранее известного времени возникновения событий для каждого случая шквала или смерча был определен конкретный конвективный шторм, который его вызвал. Кроме того, по снимкам уточнено время возникновения около 100 ветровалов, в частности для случаев шквалов, которые были зафиксированы метеостанциями по стандартным трехчасовым наблюдениям. Для дальнейшего сопоставления сигнатур на ВГО и ветровалов учитывался эффект параллакса (Radová, Seidl, 2008), приводящий к смещению положения облаков на космических снимках относительно земной поверхности. В частности, определялись сигнатуры на ВГО, которые прошли не только непосредственно над ветровалом, но и в области до 40 км к северу от него (или к северо-западу, для снимков 2006–2016 гг.).

В условиях отсутствия данных ДМРЛ, по спутниковым снимкам возможно определить лишь некоторые характеристики конвективных штормов. Так, диаметр шторма (по большой и малой оси) оценивался как диаметр его перистой наковальни по снимку в тепловом диапазоне спектра (рис. 4.4). Согласно (Orlanski, 1975) все шторма были классифицированы по масштабу (мезо- $\alpha$  или мезо- $\beta$ ), на основе порогового значения этого диаметра, равному 200 км. Также все шторма были классифицированы на квазиокруглые и квазилинейные по соотношению диаметров по большой и малой оси (пороговое значение соотношения принято равным 1,5). Согласно известной классификации (Maddox, 1980), квазиокруглые шторма мезо- $\alpha$  масштаба классифицируются как мезомасштабные конвективные комплексы (МКК), а квазилинейные – как линии шквалов. Также были выделены слабоорганизованные многоячейковые кластеры масштабов мезо- $\alpha$  и мезо- $\beta$  (NSSL, 2023).

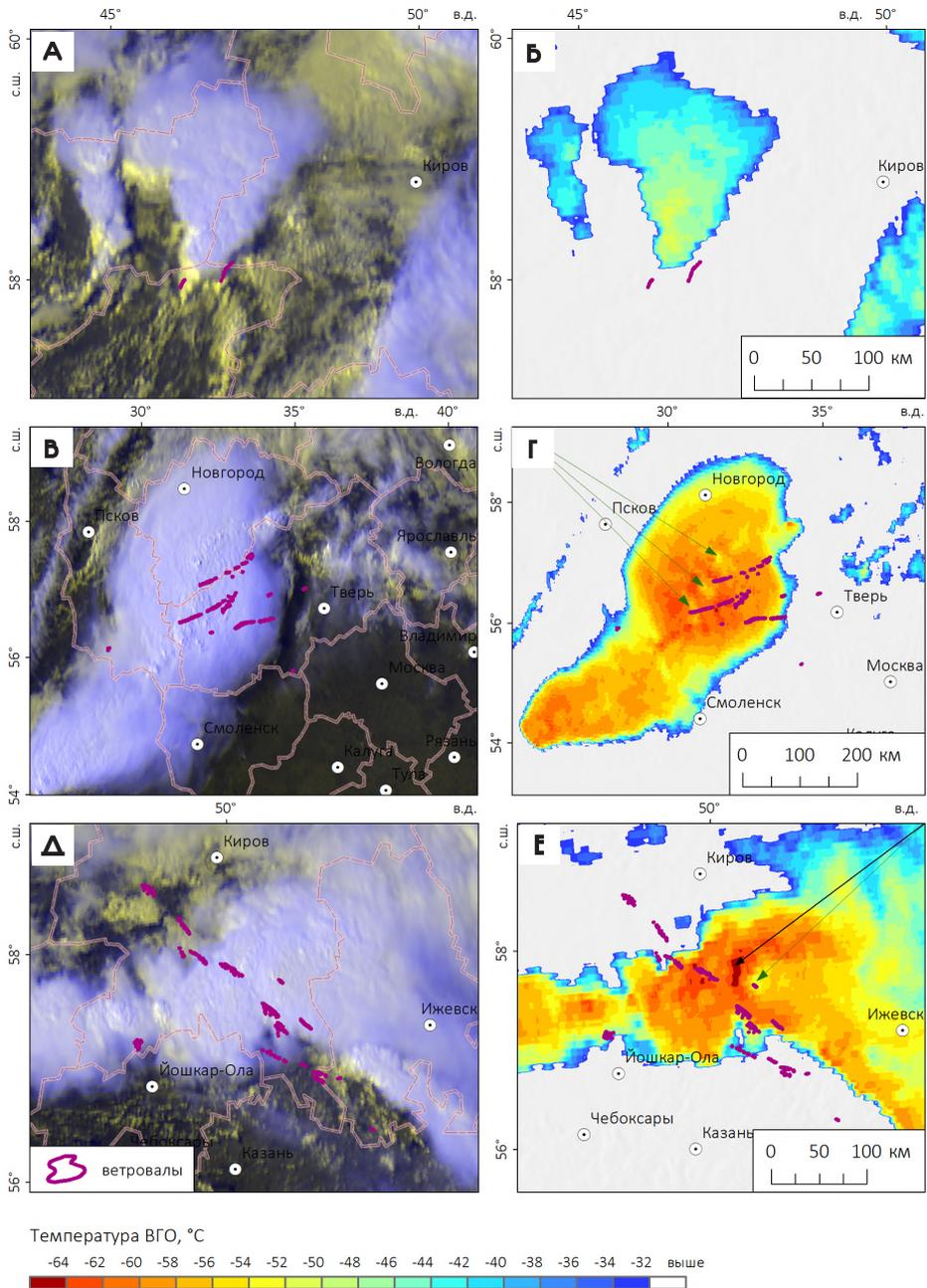
По спутниковым снимкам также возможно идентифицировать суперячейковые облака, или конвективные ячейки с устойчивым вращающимся восходящим потоком (NWS, 2022), но только в том случае, когда они являются изолированными. Такие суперячейки характеризуются наличием наковальни,

сильно вытянутой вдоль направления ветра в верхней тропосфере, и часто имеют долгоживущие сигнатуры OT или CRCUV на вершине облака (Weaver et al., 2002). Не имеют таких сигнатур только суперячейки, формирующиеся на фоне слабой конвективной неустойчивости атмосферы (подробнее см. раздел 4.2.7).



**Рис. 4.4.** Пример оценки характеристик конвективного шторма по изображению Meteosat/SEVIRI, канал IR 10,8 мкм для суперячейкового шторма 4 августа 2021 г. (12:00 UTC): а – характеристики самого шторма, б – характеристики сигнатуры Cold-U.

Таким образом, все конвективные шторма были классифицированы на шесть типов: МКК (рис. 4.5, а-б), линии шквалов (рис. 4.5, в-г), квазиокруглые или квазилинейные шторма масштаба мезо-β, слабоорганизованные кластеры, а также суперячейки (рис. 4.5, д-е). Типы штормов определялись для интервала времени, когда наблюдались шквалы или смерчи. Если в данное время происходила трансформация одного типа шторма в другой, это также учитывалось при классификации.



**Рис. 4.5.** Примеры изображений МКС, вызвавших шквалы и смерчи, на снимках Meteosat-8 в комбинации каналов HRV-IR (слева) и температура ВГО (справа): суперячейка, 19.08.2019 г. (а, б); линия шквалов с мезоциклонами 02.08.2017 г. (в, г); МКК у точки окклюзии 27.06.2020 (д, е). Зелеными стрелками обозначены кольцевые структуры (CRCUV), черными – пробои тропопаузы (OT).

Время жизни конвективных штормов оценивалось по снимкам в тепловом диапазоне. Время начала шторма оценивалось по моменту старта развития конвективных ячеек с температурой ВГО, равной  $-32^{\circ}\text{C}$  или ниже. Для регенерирующих штормов время жизни определено от начала процесса их регенерации. Момент разрушения шторма определялся по диссипации его пространственной структуры, которая четко определяется по снимкам. Если конвективная ячейка, вызвавшая шквал или смерч, впоследствии слилась с другим штормом (например, суперячейка слилась с квазилинейной системой), то время существования обоих штормов оценивалось исходя из времени диссипации всей конвективной системы.

На следующем этапе анализировались сигнатуры на ВГО, связанные с каждым случаем шквала или смерча (рис. 4.6). Признаки интенсивных восходящих потоков могут быть обнаружены на мультиспектральных спутниковых снимках как путем визуального анализа, так и автоматически с помощью различных алгоритмов. На изображениях в канале высокого разрешения сигнатуры ОТ легко идентифицировать по наличию «купола» над наковальней и по бугристой текстуре, визуально похожей на цветную капусту (Mikuš, Mahović, 2013). В тепловом канале они чаще всего проявляются в виде изолированных областей с температурой ВГО, которая значительно ниже, чем у окружающей «наковальни», состоящей из облаков верхнего яруса, растекающихся под тропопаузой. Температура наковальни обычно близка к температуре тропопаузы (Adler et al., 1985).

Наиболее известный алгоритм автоматической идентификации сигнатур ОТ по снимкам с геостационарных спутников основан на выявлении локальных минимумов температуры ВГО в пределах облачной наковальни (Bedka et al., 2010). Этот алгоритм, как и другие, в основном используются для составления многолетних рядов данных по сигнатурам ОТ (Bedka, 2011; Punge et al., 2014, 2017). Другие сигнатуры, такие как CRCUV или перистые шлейфы над наковальней, часто выявляются вручную (Cintineo et al., 2020). Количественные критерии для идентификации этих сигнатур не разработаны (Setvak et al., 2010).

В настоящей работе в соответствии с критериями (Bedka et al., 2010), к сигнатурам ОТ были отнесены небольшие группы пикселей (диаметром  $\leq 15$  км), которые были холоднее окружающей их наковальни на  $7^{\circ}\text{C}$  или более, при минимальной температуре ВГО от  $-58^{\circ}\text{C}$  и ниже. Эти пороговые значения применялись для самого холодного пикселя в пределах сигнатуры ОТ. Сигнатуры CRCUV были выделены по разнице между минимальной температурой в исходной (материнской) сигнатуре ОТ и максимальной температурой в

центральной теплом пятне, согласно (Brunner et al., 2007; Setvak et al., 2010). Эта разница обычно составляет от 5-6°C до 10–13°C. Учитывались только те хорошо детектируемые сигнатуры CRCUV, которые имели контраст температур не менее 6°C и наблюдались не менее чем на двух последовательных спутниковых снимках (рис. 4.4, 4.5).

Для каждой сигнатуры оценивались время жизни, временной лаг между образованием конвективного шторма и самой сигнатуры (с точностью  $\pm 15$  мин), минимальная температура ВГО (minCTT), температура окружающей наковальни (Tanvil) и их разность (TDIFF). Эти характеристики рассчитаны отдельно для каждого случая шквала или смерча (в случае, если они сопровождалась возникновением сигнатур на ВГО). Характеристики штормов (их типы, диаметр, продолжительность жизни, температура ВГО) и сигнатуры на ВГО анализировались отдельно для смерчей и шквалов. Статистическая значимость различий между выборками смерчей и шквалов оценивалась с помощью теста Колмогорова-Смирнова (K-S) при уровне значимости 0,05.

Общая схема использованной методики приведена на рис. 4.6. Следует подчеркнуть, что принятый подход имеет некоторую субъективность в определении как характеристик конвективных штормов (в частности, их типов), так и сигнатур на ВГО. Из-за относительно небольшого объема выборки (281 известное событие) не использовались алгоритмы автоматического распознавания сигнатур. Второе ограничение связано с недостаточной точностью данных о времени начала шквалов и смерчей, что не позволяет точно оценить временной интервал между появлением сигнатуры на ВГО и началом шквала или смерча.

### **Расчет конвективных параметров атмосферы в случаях со смерчами и шквалами**

Значения конвективных переменных (индексов), связанных с рассматриваемыми случаями шквалов и смерчей, были извлечены из ранее созданного массива значений этих переменных для территории Северной Евразии за период 1979–2021 гг. на основе данных реанализа ERA5. Краткое описание этого массива приведено в работе (Чернокульский и др., 2022а). Массив состоит из 50 переменных и включает индексы неустойчивости, рассчитанные на основе метода частицы, характеристики сдвига ветра и спиральности, а также композитные параметры. Они рассчитаны на основе приземных данных и двадцати стандартных вертикальных уровней от 1000 до 300 гПа. Поля конвективных параметров имеют пространственное разрешение 0,25° и временной шаг 1 ч, как и исходные данные ERA5 (Hersbash et al., 2020).

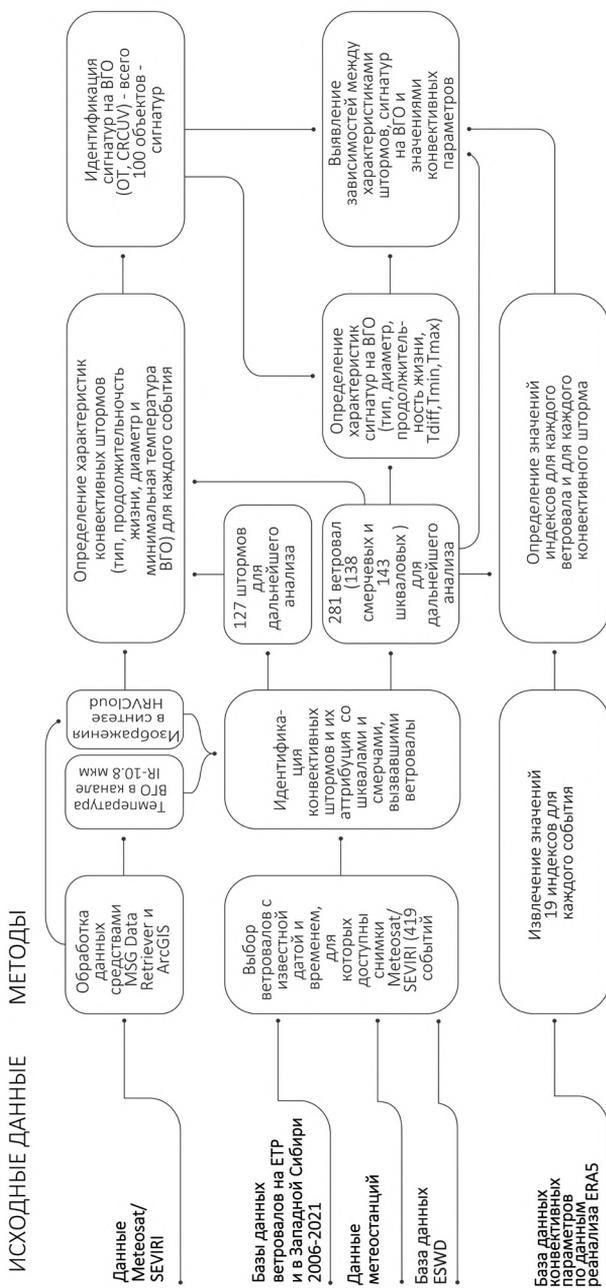


Рис. 4.6. Общая схема методики совместного анализа случаев ветровалов, характеристик конвективных штормов по спутниковым снимкам и конвективных переменных по данным реанализа ERA5.

В настоящей работе был рассмотрен сокращенный список конвективных параметров, который состоит из 19 индексов (табл. 4.5). В основном этот перечень соответствует ранее принятому перечню индексов для анализа случаев КОЯП на территории Европы и США (Taszarek et al., 2020б), что позволяет получать сравнительные оценки.

Таким образом, для каждого случая ветровала был получен набор из 19 значений конвективных параметров. Их значения, полученные по данным реанализа ERA5, были извлечены из ближайшей ячейки сетки в начальную точку каждого ветровала. Чтобы оценить условия, предшествующие развитию конвекции, рассматривались значения индексов, полученные за час до возникновения шквала или смерча. Кроме того, максимальные значения индексов (для уровня конденсации – минимальные) были извлечены в радиусе 100 км вокруг стартовой точки каждого ветровала. Аналогичный подход использовался ранее в работе (Taszarek et al., 2020б).

Таблица 4.5  
Перечень диагностических переменных (конвективных параметров), рассчитанных по данным реанализа ERA5.

Полное наименование индекса	Сокращенное наименование индекса	Единица измерения	Ссылка
Индексы, рассчитанные по методу частицы			
Доступная потенциальная энергия неустойчивости, рассчитанная для перемешанного слоя 0-1000 м над поверхностью	ML CAPE	Дж кг <sup>-1</sup>	(Grieser, 2012)
Энергия подавления конвекции для перемешанного слоя 0-1000 м над поверхностью	ML CIN		
Уровень конденсации для перемешанного слоя 0-1000 м над поверхностью	ML LCL	м	
Уровень свободной конвекции для перемешанного слоя 0-1000 м над поверхностью	ML LFC		

Полное наименование индекса	Сокращенное наименование индекса	Единица измерения	Ссылка
Прочие характеристики термодинамической неустойчивости			
Общее влагосодержание атмосферы в слое от поверхности до 500 гПа	PW	кг м <sup>2</sup>	(Grieser, 2012)
Параметры сдвига ветра и завихренности			
Сдвиг ветра в нижнем слое (0-1 км над поверхностью)	LLS		(Grieser, 2012)
Сдвиг ветра в среднем слое (0-3 км над поверхностью)	MLS	м с <sup>-1</sup>	
Глубокий сдвиг ветра (в слое 0-6 км над поверхностью)	DLS	м с <sup>-1</sup>	
Относительная завихренность шторма в слое 0-1 км над поверхностью	SRH1	м <sup>2</sup> с <sup>-2</sup>	
Относительная завихренность шторма в слое 0-3 км над поверхностью	SRH3		
Композитные параметры			
Индекс энергии и завихренности для перемешанного слоя 0-3 км над поверхностью	ML EH13	-	(Grieser, 2012)
Композитный параметр суперячеек	SCP	-	
Параметр значительного торнадо	STP	-	
Индекс угрозы опасной погоды	SWEAT	-	
Параметр значительного града	SHIP	-	
Параметр WMAXSHEAR для перемешанного слоя 0-1000 м над поверхностью	ML WMAXSHEAR	м <sup>2</sup> с <sup>-2</sup>	(Taszarek et al., 2017)

На следующем этапе значения индексов были определены также для каждого конвективного шторма, выявленного по изображениям Meteosat/SEVIRI. Если шторм вызвал только один ветровал, значения индексов, связанных с этим событием, присваивались всему конвективному шторму. Если шторм вызвал два или более ветровалов, то в качестве значений индексов для шторма были приняты максимальные значения из выборки шквалов или смерчей, связанных с этим конвективным штормом. Для определения различий конвективных переменных, связанных с возникновением различных типов штормов или сигнатур на ВГО, была выполнена оценка межгрупповых различий. Статистически значимые различия (на уровне значимости 0,05) рассчитаны на основе теста К-С.

### **Основные характеристики конвективных штормов, генерирующих шквалы и смерчи**

Всего рассмотрен 281 случай ветровалов (143 шкваловых и 138 смерчевых), которые связаны со 127 различными конвективными штормами. Более трети из них были связаны с квазилинейными конвективными системами (КЛКС) масштаба мезо- $\alpha$  (на рис. 4.7 а – линии шквалов). Для сравнения, в США КЛКС генерируют всего 21% случаев смерчей (Marion, Trapp, 2021). КЛКС, вызывающие смерчи, имеют встроенные мезоциклоны, которые в большинстве случаев хорошо видны на спутниковых изображениях как долгоживущие сигнатуры ОТ и CRCUV (см., например, рис. 4.5 в-г). Значительная часть случаев шквалов связана с МКК (21,0%) и с суперячейками, трансформировавшимися в МКК (21,7%), тогда как суперячейки, не трансформировавшиеся в МКК, вызвали только 14,0% рассматриваемых случаев шквалов (рис. 4.7 а). В свою очередь смерчи чаще генерируются локальными конвективными штормами: около трети случаев смерчей связаны с суперячейками, тогда как МКК генерируют лишь 5,8% всех смерчей.

Большинство конвективных штормов вызывали только один (53,2%) или два (22,6%) шквала или смерча (рис. 5б). Однако три долгоживущих шторма (МКК или линии шквалов), которые произошли 12 июня 2010 г., 2 августа 2017 г. и 27 июня 2020 г., вызвали более 10 шкваловых или смерчевых ветровалов (17, 18 и 14 соответственно). В этих случаях на спутниковых снимках были хорошо видны несколько сигнатур CRCUV или ОТ, которые перемещались квазипараллельно друг другу (см., например, рис. 4.5 в-г). Траектории перемещения этих сигнатур хорошо совпадают с ветровалами, что указывает на наличие в этих МКК нескольких параллельно перемещавшихся мезоциклонов.

Также эти МКС были долгоживущими, они вызывали шквалы или смерчи в течение не менее пяти часов подряд.

Диаметр рассматриваемых конвективных штормов по большой оси составлял от 35-40 км до 1250 км (рис. 4.7 г). Наименьший диаметр ( $\leq 50$  км) имеют короткоживущие суперячейки, которые формировались в условиях слабой неустойчивости и сильного сдвига ветра (Sherburn, Parker, 2014). Такие суперячейки вызвали несколько значительных смерчей в исследуемом регионе, например, вспышку 4 июня 2018 г. (Шихов и др., 2020). В свою очередь, линии шквалов были наиболее протяженными по сравнению с другими типами штормов. В ряде случаев их длина превышала 1000 км. Большинство ветровалов (62,2%) вызваны конвективными штормами масштаба мезо- $\alpha$  (диаметром  $\geq 200$  км). Всего 31,3% случаев были вызваны штормами масштаба мезо- $\beta$ , а в 6,5% случаев отмечалась трансформация из мезо- $\beta$  в мезо- $\alpha$  в период, когда наблюдался шквал или смерч. Доля штормов масштаба мезо- $\alpha$ , вызвавших шквалы (70,0%), существенно выше, чем аналогичный показатель для смерчей (54,3%).

Продолжительность жизни рассматриваемых штормов составляла от 1 ч до 26 ч (рис. 4.7 г). Примечательно, что 10 самых короткоживущих штормов (которые существовали в течение 1-3 ч) – это суперячейки, вызвавшие один или несколько смерчей. В свою очередь, все случаи шквалов были вызваны конвективными штормами с продолжительностью жизни от 3 ч и более. Наиболее долгоживущие линии шквалов могли существовать более суток, как например в случае 25.05.2020 г. в Западной Сибири, когда наблюдалось сочетание сильного сдвига ветра и значительной конвективной неустойчивости атмосферы, что поддерживало развитие конвекции даже в ночные и утренние часы (Гочаков и др., 2021).

Также был рассмотрен временной интервал между формированием конвективного шторма и временем начала шквала или смерча (рис. 4.7д). В большинстве случаев ветровалы наблюдались через 2-6 ч после начала формирования облачной системы. Медианное значение составляет 3,0 ч для смерчей и 3,5 ч для событий, не связанных со смерчами (эта разница статистически значима). Примечательно, что 15,3 % смерчей и 7,0 % шквалов сформировались в течение часа после образования вызвавшего их конвективного шторма, что свидетельствует о наличии в этих случаях взрывной конвекции. Меньшая доля случаев шквалов в этой выборке также указывает на более высокую предсказуемость шквалов по сравнению со смерчами.

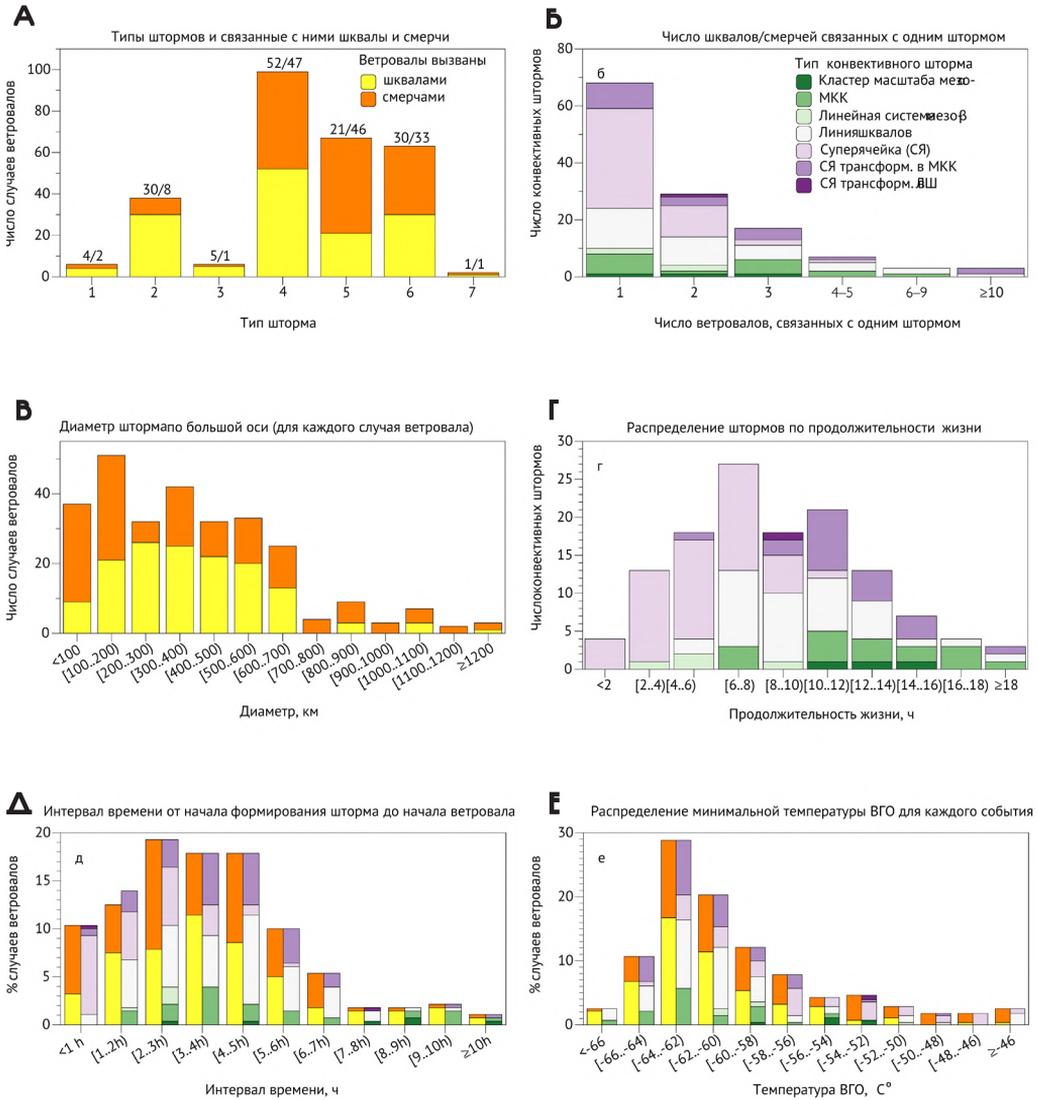


Рис. 4.7. Характеристики конвективных штормов и вызванных ими ветровалов:

а) количество ветровалов (вызванных шквалами или смерчами), связанных с различными типами штормов:

- 1 – слабоорганизованный кластер,
- 2 – МКК,
- 3 – КЛКС масштаба мезо-β,
- 4 – линия шквала (КЛКС масштаба мезо-α),
- 5 – суперячейка,
- 6 – суперячейка, трансформировавшаяся в МКК,
- 7 – суперячейка, трансформировавшаяся в КЛКС;

б) количество ветровалов, связанных с одним конвективным штормом;

с) распределение ветровалов в зависимости от размера соответствующего конвективного шторма (диаметра его большой оси);

г) распределение конвективных штормов в зависимости от времени их жизни;

д) распределение ветровалов в зависимости от временного интервала между формированием соответствующего конвективного шторма и временем начала явления;

е) распределение минимальной температуры на ВГО в случаях с ветровалами. Объем выборки – 281 случай для ветровалов и 127 случаев для конвективных штормов

Минимальная температура ВГО в случаях со шквалами и смерчами, составляла от  $-32^{\circ}\text{C}$  до  $-70^{\circ}\text{C}$  (при среднем значении  $-60,1^{\circ}\text{C}$  и медианном  $-62,0^{\circ}\text{C}$ ) (рис. 4.7е). Примечательно, что различия между распределениями температуры ВГО для смерчей (медиана  $-61^{\circ}\text{C}$ ) и шквалов (медиана  $-63^{\circ}\text{C}$ ) статистически значимы согласно тесту К-С. Самые высокие значения температуры ВГО ( $-50^{\circ}\text{C}$  и выше) характерны для короткоживущих штормов (с продолжительностью жизни 1–5 ч), формирующихся в условиях слабой неустойчивости и сильного сдвига ветра. Как отмечено выше, в таких условиях формируются в основном суперячейки, вызывающие смерчи. В свою очередь, долгоживущие шторма обычно характеризовались низкой температурой ВГО ( $-60^{\circ}\text{C}$  и ниже).

Отметим, что на временную однородность данных о температуре ВГО могло повлиять перемещение спутника Meteosat-8 в 2017 г. Снимки, полученные в 2006–2016 гг., имеют более низкое пространственное разрешение и более сильный эффект параллакса по сравнению с изображениями за 2017–2021 гг. Для оценки неоднородности были сопоставлены две подвыборки значений температуры ВГО за 2006–2016 гг. и 2017–2021 гг. Установлено, что различия между ними статистически значимы (по критерию К-С). При этом медианные

значения температуры ВГО в первом периоде несколько ниже, чем во втором ( $-60,9^{\circ}\text{C}$  и  $-59,8^{\circ}\text{C}$  соответственно).

### Сигнатуры на верхней границе облаков

Всего выделено 100 характерных объектов (сигнатур) на ВГО, связанных с возникновением шквалов или смерчей. Большинство ветровалов (61%) сопровождалось формированием сигнатур OT и CRCUV. В случаях со шквалами такие сигнатуры наблюдались чаще (67,1%), чем в случаях со смерчами (53,6%) (рис. 4.8 а); однако достоверной разницы между сигнатурами, сопровождавшими смерчи или шквалы, выявить не удалось. Ни OT, ни CRCUV не являются надежными индикаторами только случаев смерчей или шквалов; кроме того, поскольку анализ изначально основан на выборке случаев ветровалов, на его основе невозможно оценить коэффициент ложных тревог для сигнатур, как предикторов формирования смерча или шквала.

Сигнатуры OT наблюдались наиболее часто, с ними связаны 24% случаев смерчей и 31,5% случаев шквалов, тогда как сигнатуры CRCUV наблюдались в 19,6% случаев со смерчами и 23,8% случаев шквалов. В большинстве случаев CRCUV сопровождалась OT сигнатурами, поскольку так называемая «родительская» OT является составной частью большинства сигнатур холодного кольца (Setvak et al., 2010) и U/V образных структур (Brunner et al., 2007). Однако эти «сигнатуры не рассматривались отдельно от CRCUV. Исключением являются случаи с трансформацией OT в CRCUV, что наблюдалось в 11,9% случаев шквалов и в 10,1% случаев смерчей.

Для сравнения, в Европе с сигнатурами OT связаны около 53% случаев крупного града, 52% случаев сильных шквалов и только 14% случаев смерчей (Bedka, 2011). В рассматриваемой выборке доля событий, связанных с сигнатурами на ВГО, существенно выше, особенно для смерчей. Но прямое сравнение с результатами (Bedka, 2011) невозможно, поскольку в настоящей работе оценивались несколько типов сигнатур (не только OT). Также важно отметить влияние сезонного фактора – в лесной зоне России большинство случаев КОЯП отмечается в летние месяцы, тогда как в Европе значительная их часть наблюдается весной и осенью (Taszarek et al., 2020a), в связи с чем в России такие явления возникают обычно на фоне более сильной конвективной неустойчивости атмосферы.

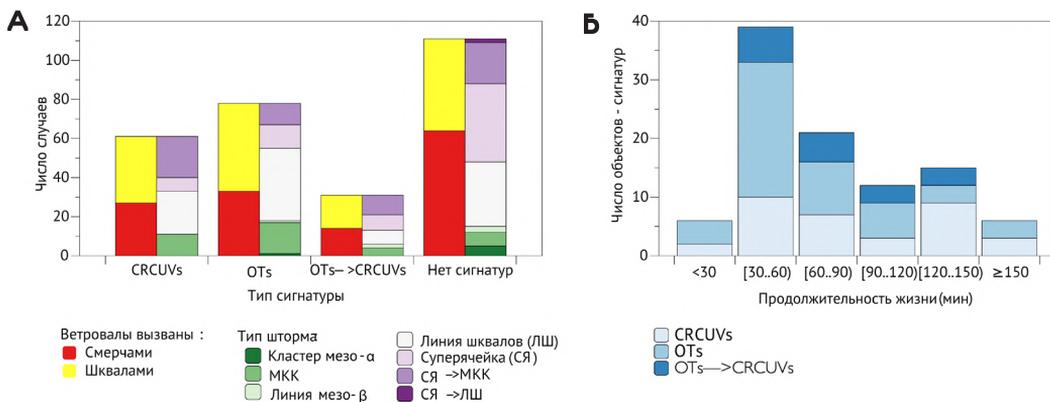
Была рассмотрена также связь частоты появления сигнатур на ВГО с типом, размерами и продолжительностью жизни конвективных штормов. В частности,

установлено, что доля штормов масштаба мезо- $\beta$ , имеющих сигнатуры на ВГО (50,9%) значительно ниже, чем для штормов масштаба мезо- $\alpha$  (66,3%). Также примечательно, что только 20% короткоживущих штормов с временем жизни  $\leq 5$  ч имеют сигнатуры на ВГО, тогда как для долгоживущих штормов (время жизни  $\geq 10$  ч) эта доля достигает 68,7%.

Время жизни сигнатур составляет от 15 мин (т.е. сигнатура наблюдается на двух последовательных изображениях MSG2) до 4,5 ч (рис. 4.8 б). К наиболее долгоживущим сигнатурам относятся как CRCUV (6 из 11 случаев со временем жизни более 2 ч), так и OT (5 случаев). Такие долгоживущие сигнатуры наблюдались в некоторых случаях с долгоживущими шквалами, вызвавшими крупные ветровалы, например 27.06.2020 г. (Chernokulsky et al., 2022), 15.05.2021 гг. (Чернокульский и др., 2022б). В большинстве случаев сигнатуры формировались в течение 2–5 ч после образования конвективного шторма (при среднем временном лаге около 3,3 ч). В 10% случаев сигнатуры формировались в течение первого часа после образования МКС или суперячейки, что может указывать на взрывную конвекцию в этих случаях.

Интервал времени между появлением сигнатур на ВГО и возникновением шквала или смерча критически важен для оценки применимости информации о сигнатурах на ВГО в целях наукастинга. Для 115 (67,6%) проанализированных случаев шквалов и смерчей с сигнатурами на ВГО оценить этот временной интервал не удалось, поскольку само время возникновения этих шквалов и смерчей было уточнено по снимкам Meteosat/SEVIRI. Среди остальных 54 событий, сопровождавшихся сигнатурами на ВГО, в девяти случаях сигнатура на изображении появилась уже после начала шквала или смерча. Только в 15 случаях (28%) интервал времени между формированием сигнатуры на ВГО и возникновением шквала или смерча 1 ч или более. В этих случаях спутниковая информация о сигнатурах могла быть успешно использована для наукастинга.

Большинство сигнатур (65%) были связаны только с одним шквалом или смерчем. В других случаях одна сигнатура была связана с более чем одним событием, причем в трех случаях (08.02.2017, 27.06.2020 и 08.02.2021) одна и та же сигнатура на ВГО сопровождала прохождение до восьми различных шквалов или смерчей.



**Рис. 4.8.** Число случаев смерчей и шквалов, вызванных штормами разного размера (мезо- $\alpha$  или мезо- $\beta$ ), связанных с различными сигнатурами на ВГО (а) и распределение сигнатур в зависимости от времени их существования (б).

Также были проанализированы значения параметра TDIFF, которые характеризуют температурный контраст в пределах сигнатуры, и следовательно, ее читаемость на спутниковом снимке. В частности, для сигнатур типа OT это разность между минимумом температуры ВГО и температурой облачной наковальни, а для сигнатур типа CRCUV – разность между минимумом температуры ВГО и максимумом в пределах центрального теплого пятна. Параметр TDIFF характеризует выраженность сигнатуры на спутниковом снимке и коррелирует с пространственным разрешением снимков. Значения параметра TDIFF были сопоставлены для двух подвыборок, полученных за периоды 2006–2016 и 2017–2021 гг. В результате выявлена статистически значимая разница между двумя подвыборками (со средним значением TDIFF 7,6°C и 8,6°C для двух периодов соответственно). Это указывает на существенное влияние перемещения спутника Meteosat-8 на оценку характеристик сигнатур на ВГО. Доля ветровалов, сопровождающихся этими сигнатурами, близка в двух подвыборках: 63,4% в 2006-2016 гг. и 59,2% в 2017-2021 гг., что предположительно указывает на отсутствие критических различий в данных о сигнатурах, полученных до и после перемещения спутника Meteosat-8.

## **Особенности условий возникновения шквалов и смерчей, различных типов конвективных штормов и сигнатур на верхней границе облаков**

### **Общая характеристика условий возникновения шквалов и смерчей**

Для возникновения мощных конвективных штормов, генерирующих шквалы и смерчи, наиболее благоприятно сочетание сильной конвективной неустойчивости, высокого влагосодержания воздушной массы, а также сильного сдвига ветра в нижней и средней тропосфере. Роль сдвига ветра состоит в разделении восходящего и нисходящего потоков, что поддерживает длительное существование конвективных штормов (Brooks et al., 2018; Taszarek et al., 2020b). Согласно (Rasmussen., 2003), для возникновения суперячеек большое значение имеет также относительная завихренность (SRH). При сочетании вышеперечисленных условий наблюдаются закритические значения композитных параметров (табл. 4.5), позволяющих оценить вероятность формирования мощных конвективных штормов.

В целом условия возникновения рассматриваемых случаев шквалов и смерчей соответствуют этим общим закономерностям. Так, медианное значение ML CAPE для всей выборки составляет 888 Дж/кг, DLS – 23,8 м/с, а LLS – 13,2 м/с. Примечательно, что при DLS менее 15 м/с наблюдалось всего 10% случаев, а при LLS менее 10 м/с – 21% случаев. Это указывает на исключительную важность сдвига ветра в нижней и в средней тропосфере для возникновения шквалов и смерчей. Более половины случаев (55,5%) сформировались при значениях CAPE > 500 Дж/кг и DLS > 20 м/с, в том числе 73 случая – при CAPE свыше 1000 Дж/кг (т.е. при сочетании сильной неустойчивости и сильного сдвига ветра). Медианное значение общего влагосодержания воздуха (PW) достигает 37,1 мм, что указывает на приуроченность случаев шквалов и смерчей к зонам конвергенции, в которых и наблюдаются столь высокие значения PW. Медианное значение параметра ML WMAXSHEAR составило 851, а его критическое значение, равное 500 (Taszarek et al., 2020), оказалось превышено в 83% случаев

### **Различия значений конвективных параметров в случаях со шквалами и смерчами**

Условия, при которых формировались шквалы или смерчи, существенно различаются по значениям ряда конвективных параметров. Выявленные различия в основном согласуются с результатами ранее опубликованных исследований для Европы и Северной Америки (Taszarek et al., 2020), а также

для Северной Евразии (Калинин и др., 2021). Так, смерчи формируются при значительно более низких значениях энергии неустойчивости (ML CAPE), общего влагосодержания атмосферы (PW) и уровня конденсации (LFC), по сравнению со шквалами (рис. 4.9). В основном эти различия обусловлены тем, что несколько вспышек смерчей произошли в относительно холодных воздушных массах, в условиях низкого CAPE (значительно меньше 500 Дж/кг) и сильного сдвига ветра. В то же время большинство композитных параметров, зависимых от значений CAPE, не показывают статистически значимых различий между шквалами и смерчами. В целом смерчи связаны с более низкими значениями энергии противодействия конвекции ML CIN, чем шквалы, что также согласуется с ранее опубликованными данными (Taszarek et al., 2020). Еще одним критическим фактором для образования смерчей является низкий уровень нижней границы облачности, что связано со значениями уровня конденсации (LCL), который в случаях со смерчами значительно ниже, чем при возникновении шквалов. В свою очередь, смерчи формировались при более сильном сдвиге ветра (DLS и LLS), относительной завихренности (SRH) и параметра значительного торнадо (STP) по сравнению со шквалами (рис. 4.9). Значимость различий индексов в основном не различается при расчете для стартовой точки ветровала, или для радиуса 100 км вокруг данной точки.

Также выполнено сравнение значений конвективных параметров с ранее опубликованными данными по территории Европы и США (Taszarek et al., 2020a). Так, медианные значения CAPE в случаях со шквалами и смерчами несколько выше, чем в Европе, но ниже, чем в США. Для смерчей различия более значимы, чем для шквалов. Это обусловлено сезонностью возникновения этих явлений – на исследуемой территории большинство случаев приходится на летний сезон, когда конвективная неустойчивость сильнее, тогда как в Европе смерчи и шквалы часто наблюдаются в переходные сезоны (Taszarek et al., 2020b). То же можно сказать и про значения PW. Медианные значения DLS в случаях со шквалами оказались несколько выше, чем в Европе и в США, а в случаях со смерчами – ниже, чем в США и близки к таковым в Европе. Значения SRH в случаях со смерчами в Европе также существенно ниже, чем в рассматриваемой выборке. И наконец, значения композитного параметра ML WMAXSHEAR в случаях со смерчами оказались выше, чем в Европе и ниже, чем в США, а в случаях со шквалами – близко к оценке для США (Taszarek et al., 2020b).

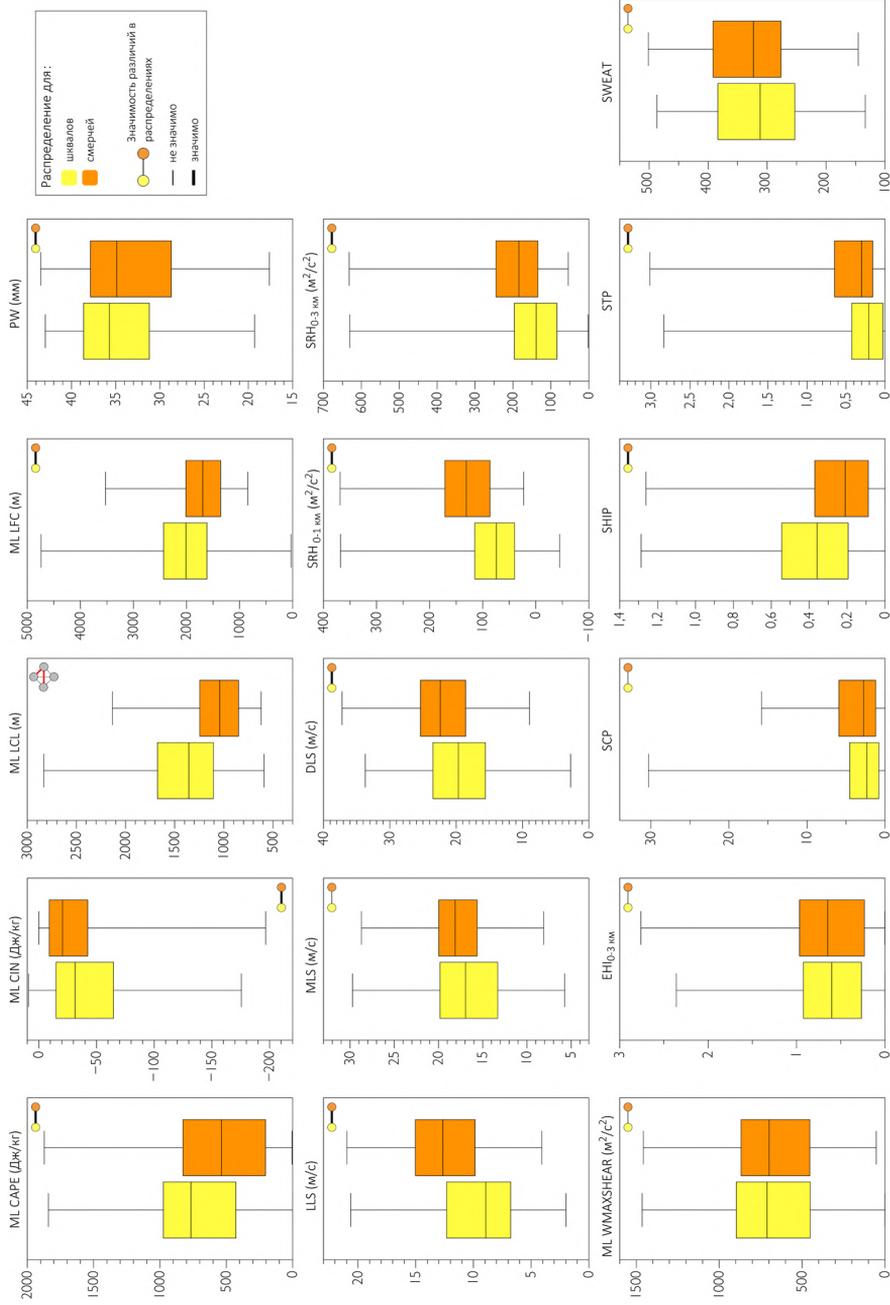
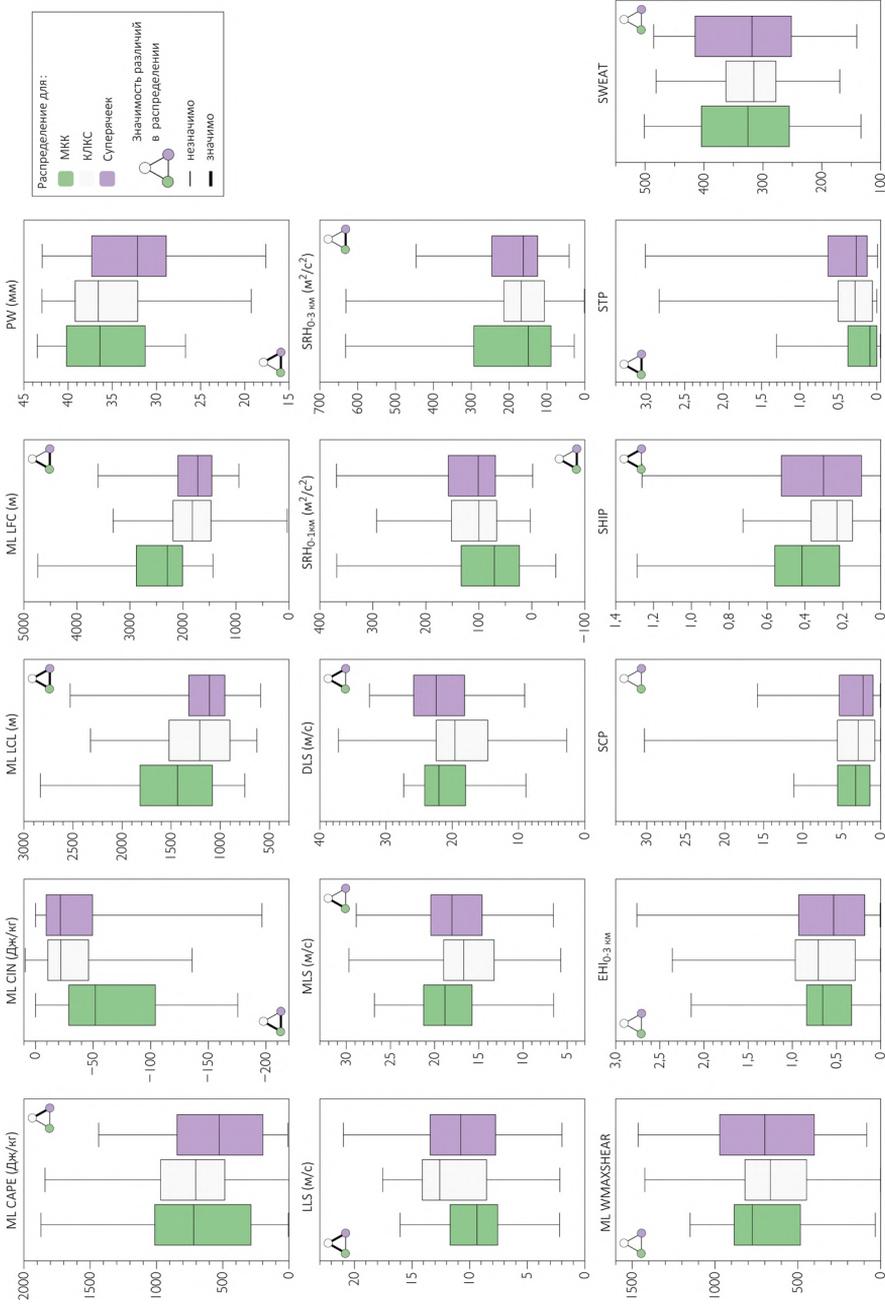


Рис. 4.9. Распределение значений различных конвективных параметров в случаях со смерчами (138 событий) и шквалами (141 событие). Выделены статистически значимые различия

Таким образом, значения большинства конвективных параметров, полученных по рассматриваемой выборке случаев, оказались выше, чем в случаях со шквалами и смерчами в зарубежной Европе. Это может быть обусловлено не только сезонностью, но и способом формирования выборки. Рассматриваемая выборка создана на основе данных о ветровалах, тогда как выборка для зарубежной Европы создана на основе всего массива данных ESWD, в основном по отчетам об ущербе (Groenemeijer et al., 2017). В результате в выборку случаев для Европы могли попасть менее интенсивные явления, чем в рассматриваемую выборку случаев. Это предположение было ранее подтверждено на примере Пермского края. Для нее было показано, что шквалы и смерчи, вызывающие ветровалы, формируются при более высоких значениях большинства конвективных параметров в сравнении с явлениями, которые не привели к ветровалам (Shikhov et al., 2021).

Максимальное значение CAPE из всех событий в выборке (1962 Дж/кг) было связано со шквалом 30 июля 2017 г., а самые сильные сдвиги ветра DLS (42,5 м/с) и LLS (21,2 м/с) наблюдались в случаях со вспышками смерчей 13.09.2018 г. и 12.06.2010 г. соответственно. Максимальные значения безразмерных композитных параметров ML WMAXSHEAR (1736) и STP (3,8) были связаны с крупной вспышкой шквалов и смерчей 12–13 июня 2010 г. (Дмитриева, Песков, 2013), когда значительный ущерб причинили как сильные смерчи, так и шквалы. Интересно, что самые высокие значения SRH в слое 0–3 км ( $764 \text{ м}^2/\text{с}^2$ ) были связаны со шквалом 25 мая 2020 г., который наблюдался к востоку от Урала. Четыре самых высоких значения параметра LCL в выборке (свыше 2000 м) связаны со шквалами, наблюдавшимися во время сильной жары в июле 2010 и 2020 гг., когда приземная максимальная температура воздуха достигала  $+34...+36^\circ\text{C}$ . В это число входят наиболее разрушительные шквалы 27 июня 2010 г. и 29 июля 2010 г., классифицированные как деречо (Chernokulsky et al., 2022).



**Рис. 4.10.** Распределение различных конвективных параметров в случаях с разными типами штормов: суперчейками (132 события), квазилинейными системами (105 событий) и МКК (44 события). Выделены статистически значимые различия.

### Особенности значений конвективных параметров для разных типов штормов и взаимосвязи с их характеристиками

На рис. 4.10 показано распределение конвективных параметров в зависимости от типа штормов. В целом суперячейковые шторма формировались при более низких значениях LFC, CAPE и PW по сравнению с другими типами штормов. Поскольку суперячейки часто генерируют смерчи, это частично соответствует распределениям в зависимости от типа явления, показанным на рис. 4.9. Также установлено, что квазилинейные системы формировались при более низких значениях DLS, но более высоких значениях LLS, чем суперячейки и МКК. Можно отметить, что при низкой энергии неустойчивости CAPE (менее 500 Дж/кг) наблюдались в основном суперячейки и квазилинейные шторма, и только один случай ночного МКК. В свою очередь, при слабом сдвиге ветра (DLS менее 12 м/с) не было ни одного случая шквала или смерча, связанного с суперячейкой.

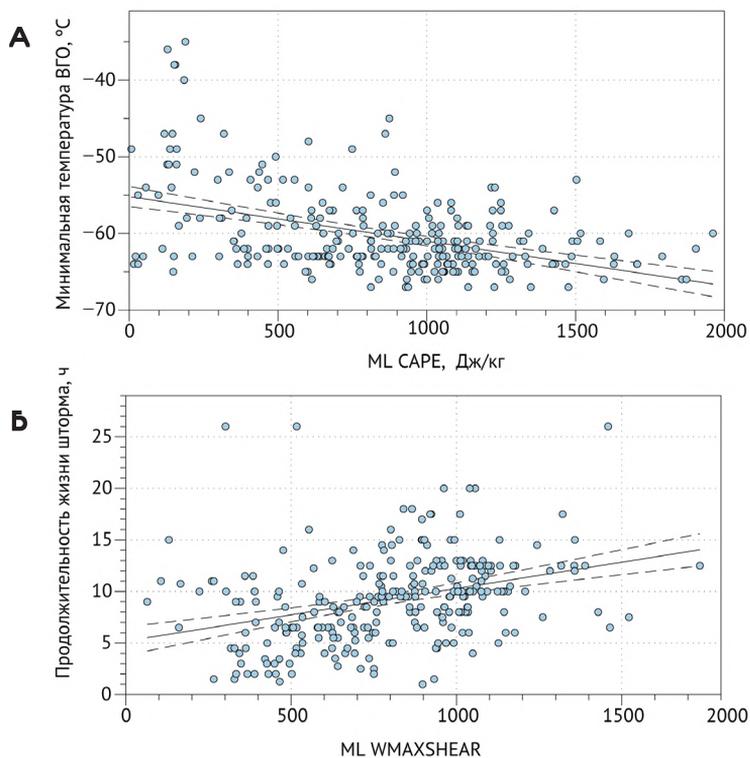
Различия в относительной завихренности и композитных параметрах между тремя типами штормов в основном незначительны. Параметр SCP не является информативным для выявления условий, благоприятных для формирования суперячеек над исследуемой территорией.

Самые высокие значения SCP связаны в основном с квазилинейными штормами. В то же время девять из десяти штормов с самыми высокими значениями параметра STP ( $> 2$ ) были суперячейками. Однако лучшими дискриминаторами суперячеек являются индексы PW и LCL (т.е. суперячейки формируются в воздушных массах с меньшим интегральным влагосодержанием, но с более низким уровнем конденсации, чем другие типы штормов).

Установлено, что статистическая значимость различий в распределении индексов для различных пар типов штормов чувствительна к методике их расчета (зависит от того, рассчитаны ли индексы для стартовой точки пути шквала (смерча), или в радиусе 100 км вокруг него). Только пять индексов (ML, LFC, PW, DLS, LLS и SCP) имеют одинаковые оценки значимости для всех пар типов штормов, независимо от методики расчета.

Чтобы оценить зависимости характеристик штормов (диаметра по большой оси, продолжительности жизни и минимальной температуры ВГО) от значений конвективных параметров, были рассчитаны ранговые коэффициенты корреляции Спирмена между этими характеристиками и значениями конвективных параметров. При этом использовались результаты расчета как для стартовой точки ветровала, так и максимумы в радиусе 100 км вокруг него

(для LCL – минимумы) (табл. 4.6). Для конвективных штормов, вызвавших два или более случаев шквалов или смерчей, оценивались максимальные значения конвективных индексов среди всех, связанных с данным штормом.



**Рис. 4.11.** Взаимосвязь между ML CAPE и минимальной температурой на ВГО (а) и ML WMAXSHEAR и временем жизни конвективных штормов (б)

Большинство коэффициентов корреляции оказались статистически значимыми. В частности, диаметр МКС имеет статистически значимую корреляцию с композитными параметрами SWEAT и EHI в слое 0-3 км. Коэффициенты корреляции с ML CAPE и PW также статистически значимы, что означает, что обширные МКС формировались преимущественно в условиях, благоприятных для глубокой влажной конвекции. Корреляцию диаметра МКС со сдвигом ветра в слое 0-1 км (LLS) можно, по-видимому, объяснить значимостью этого параметра для формирования долгоживущих протяженных линий шквалов (см., например, (Rotunno et al., 1988)).

Таблица 4.6

Коэффициенты ранговой корреляции Спирмена между характеристиками конвективных штормов и значениями индексов неустойчивости. Выделены статистически значимые корреляции

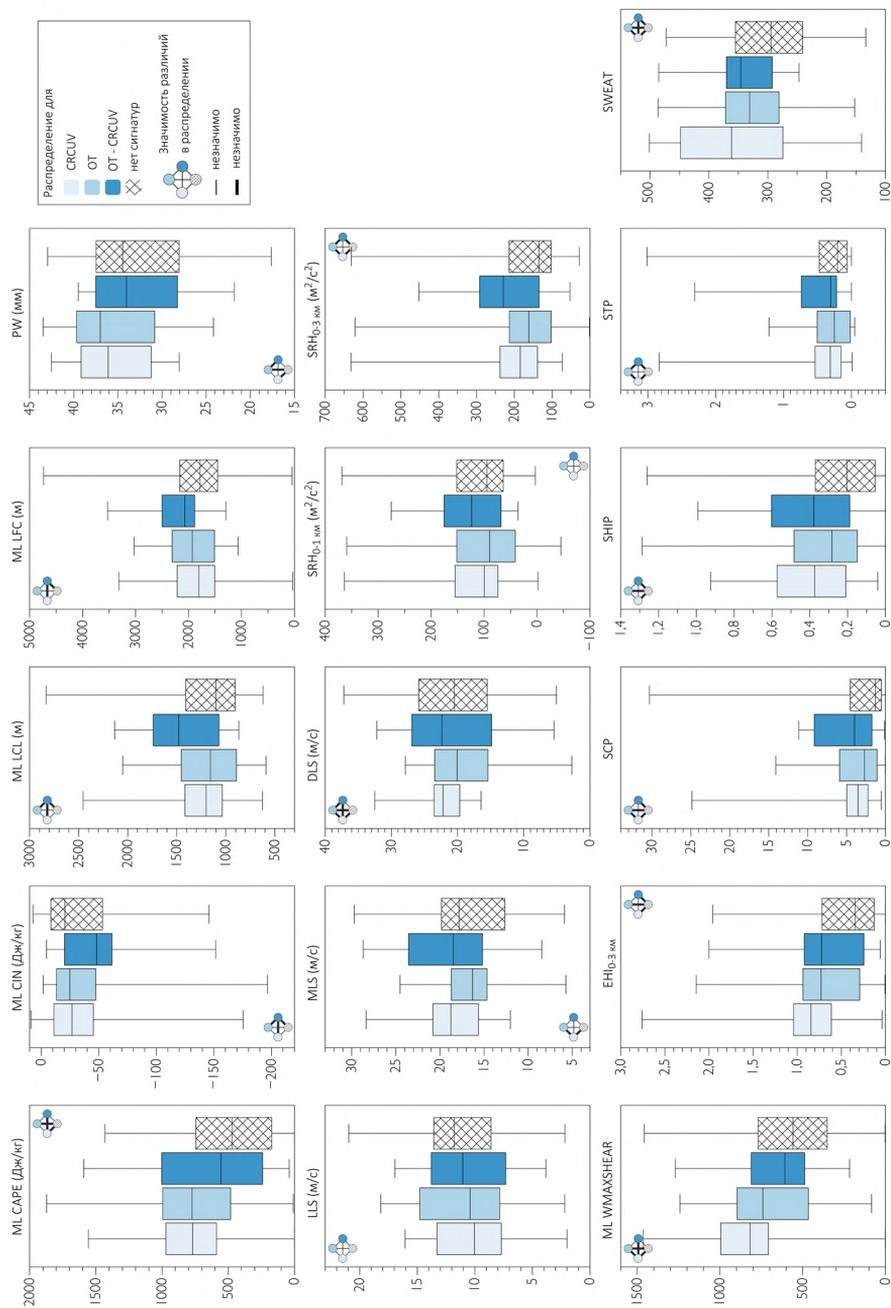
Характеристики шторма	ML LCL, м	ML LFC, м	MLCAPE, Дж/кг	ML CIN, Дж/кг	PW, мм	DLS, м/с	MLS, м/с	LLS, м/с	ML EHI0-3km	ML WMS	SRH1, м <sup>2</sup> /с <sup>2</sup>	SRH3, м <sup>2</sup> /с <sup>2</sup>	SCP	SHIP	STP	SWEAT
	Значения для стартовой точки ветровала															
Диаметр	0.08	0.09	0.23	-0.13	0.31	0.00	0.01	0.33	0.31	0.19	0.22	0.17	0.20	0.06	0.08	0.30
Минимум Твго	-0.11	-0.14	-0.38	0.16	-0.36	-0.02	-0.08	0.02	-0.37	-0.33	-0.07	-0.16	-0.21	-0.32	-0.16	-0.44
Продолжительность жизни	0.15	0.35	0.44	-0.26	0.29	0.17	0.20	0.01	0.50	0.47	0.15	0.26	0.43	0.52	0.30	0.35
Максимум в радиусе 100 км от стартовой точки ветровала																
Диаметр	0.10	-0.03	0.20		0.21	-0.06	-0.01	0.31	0.28	0.17	0.18	0.12	0.18	-0.01	0.09	0.36
Минимум Твго	-0.07	0.01	-0.36		-0.24	0.05	-0.06	0.00	-0.34	-0.30	-0.05	-0.11	-0.19	-0.25	-0.11	-0.48
Продолжительность жизни	0.18	0.16	0.52		0.34	0.08	0.17	0.06	0.53	0.48	0.13	0.25	0.39	0.57	0.32	0.41

Минимальная температура ВГО имеет статистически значимую отрицательную корреляцию с параметрами, характеризующими интенсивность восходящих движений, а именно ML CAPE (рис. 4.11 а), PW, композитными параметрами ML EHI, WMAXSHEAR и особенно SWEAT. То есть самые низкие значения температуры ВГО отмечались в теплых и влажных неустойчивых воздушных массах (Bedka, 2011; Punge et al., 2017). Экстремально низкие значения температуры ВГО в большинстве случаев связаны с формированием сигнатур OT и CRCUV на ВГО.

В свою очередь, продолжительность жизни конвективного шторма определяется сочетанием достаточной неустойчивости и благоприятного профиля ветра. В результате параметр WMAXSHEAR, представляющий собой линейную комбинацию CAPE и DLS, является простым и достаточно эффективным предиктором формирования долгоживущих конвективных штормов (Taszarek et al., 2020б). Также установлено, что и другие композитные параметры (EHI, SWEAT, SHIP) имеют статистически значимую корреляцию с продолжительностью жизни шторма (рис. 4.11 б).

### **Связь конвективных переменных с сигнатурами на ВГО**

Проанализированы также различия конвективных переменных для случаев шквалов и смерчей, связанных с разными типами сигнатур на ВГО (или их отсутствием) (рис. 4.12). Как и в ранее опубликованных работах (Bedka, 2011; Setvak et al., 2010) показано, что энергия неустойчивости является лучшим дискриминатором случаев с сигнатурами на ВГО и без них. Значения конвективных параметров, связанных с CAPE (ML EHI, ML WMAXSHEAR, SCP и SHIP) также значительно выше в случаях с сигнатурами по сравнению со случаями без них. Следует выделить и некоторые другие особенности. Так, события с сигнатурами CRCUV отличаются более высокими значениями параметров SWEAT и ML WMAXSHEAR по сравнению с событиями с сигнатурами OT. Поскольку WMAXSHEAR является линейной комбинацией CAPE и DLS (Taszarek et al., 2017), то можно предположить, что сигнатуры CRCUV более тесно связаны как с высоким CAPE, так и с сильным сдвигом ветра. Примечательно, что в условиях с низким DLS ( $< 12$  м/с) и экстремально высоким CAPE (более 1500 Дж/кг) преобладают события с сигнатурами OT. Шквалы и смерчи, не сопровождавшиеся образованием сигнатур на ВГО, чаще формировались в условиях слабой или умеренной неустойчивости (CAPE  $< 1000$  Дж/кг). Также при наиболее сильном сдвиге ветра (DLS свыше 33 м/с) преобладают и события без сигнатур на ВГО.



**Рис. 4.12.** Распределение различных конвективных параметров в случаях с разными типами сигнатур на ВГО: OT (88 событий), CRCUV (61 событие), трансформация OT в CRCUV (31 событие), и случаи без сигнатур (111 событий). Выделены статистически значимые различия.

Также были рассчитаны коэффициенты ранговой корреляции Спирмена между значениями конвективных переменных и продолжительностью жизни сигнатур на ВГО. Большинство коэффициентов корреляции слабые ( $\leq 0,20$ ) и статистически незначимые, что свидетельствует об общей независимости времени жизни сигнатуры от конвективной неустойчивости, профиля ветра и относительной спиральности. Статистически значимый коэффициент корреляции был обнаружен только для параметра SHIP (0,26), высокие значения которого наблюдаются при сильной неустойчивости и сильном сдвиге ветра.

Таким образом, полученные результаты дают новую информацию о количественных соотношениях между характеристиками конвективных штормов, шквалами и смерчами, которые они вызывают, сигнатурами на ВГО и значениями конвективных параметров атмосферы для ранее малоизученного региона – западной части Северной Евразии. С одной стороны, эта информация может быть использована для дальнейшего уточнения особенностей формирования смерчей и шквалов. С другой стороны, ее можно использовать для повышения предсказуемости этих событий, например путем включения информации о сигнатурах на ВГО в системы наукастинга в районах, для которых отсутствуют данные ДМРЛ.

Таким образом, полученные результаты дают новую информацию о количественных соотношениях между характеристиками конвективных штормов, шквалами и смерчами, которые они вызывают, сигнатурами на ВГО и значениями конвективных параметров атмосферы для ранее малоизученного региона – западной части Северной Евразии. С одной стороны, эта информация может быть использована для дальнейшего уточнения особенностей формирования смерчей и шквалов. С другой стороны, ее можно использовать для повышения предсказуемости этих событий, например путем включения информации о сигнатурах на ВГО в системы наукастинга в районах, для которых отсутствуют данные ДМРЛ.

Также важно отметить, что в рассматриваемую выборку были включены конвективные шторма, вызвавшие наиболее сильные шквалы и смерчи в России за последние 15 лет. Это, в частности, два случая дичко летом 2010 г. (Chernokulsky et al., 2022), разрушительные шквалы и смерчи 12-13 июня 2010 г. (Дмитриева, Песков, 2013), сильный шквал 15 мая 2021 г. (Чернокульский и др., 2022б); рекордная вспышка смерчей 2 августа 2017 г. (Чернокульский и др., 2021), а также смерч с интенсивностью F4, наблюдавшийся 18 июня 2017 г. в Зауралье (Chernokulsky et al., 2020б). Все эти события были связаны с долгоживущими штормами масштаба мезо- $\alpha$  (КЛКС

и МКК, или суперячейками, трансформировавшимися в МКК). Большинство из них сопровождалось сигнатурами типа CRCUV, хотя смерч 18 июня 2017 г. был связан только с сигатурой OT. Также примечательно, что все они сформировались в условиях умеренной или сильной неустойчивости ( $CAPE > 500$  Дж/кг) в сочетании с сильным сдвигом ветра (с DLS 20-32 м/с и LLS 11-21 м/с). Такие условия способствовали формированию долгоживущих штормов и сильных восходящих потоков, что приводило к появлению сигнатур на ВГО. Только одно из наиболее разрушительных событий, включенных в выборку (шквал в Москве 29 мая 2017 г.), сформировалось при относительно низких значениях  $CAPE (< 500$  Дж/кг), и вызвавшая его МКС не имела сигнатур на ВГО.

### **Особенности возникновения смерчей при слабой неустойчивости и сильном сдвиге ветра**

В ряде исследований для территории Европы (Bedka, 2011; Púčík et al., 2015) и США (Taszarek et al., 2020) ранее уже были показаны отличия условий возникновения смерчей от условий, благоприятных для развития шквалов и крупного града, аналогичные описанным в предыдущем разделе. Так, если большинство случаев крупного града и шквалов возникает при сочетании сильной неустойчивости ( $CAPE > 1000$  Дж/кг) и сдвига ветра в слое 0–6 км (DLS  $> 20$  м/с), то смерчи часто формируются в условиях слабой неустойчивости ( $CAPE < 500$  Дж/кг), но при сильном сдвиге ветра (Sherburn, Parker, 2014). В Северной Америке и в странах Европы смерчи, возникающие в таких условиях, считаются наиболее труднопредсказуемыми (Hanstrum et al., 2002; Tyrrell, 2007; Sherburn et al., 2016). Их анализу уделяется значительное внимание (Sherburn et al, 2016).

На территории Северной Евразии, согласно данным (Chernokulsky et al., 2019) в условиях слабой неустойчивости ( $CAPE < 500$  Дж/кг) формируется менее 10% значительных смерчей. До недавнего времени сильная неустойчивость считалась важнейшим ингредиентом, необходимым для возникновения смерчей. Однако полученные многолетние данные о ветровалах позволили доказать, что значительные смерчи при слабой неустойчивости вполне характерны и для этого региона.

Для более детального анализа выбраны случаи 4.06.2018 в Кировской области и 13.09.2018 в Пермском крае, в каждом из которых сформировалось более пяти смерчей, причем некоторые из них проходили через населенные пункты и нанесли ущерб. В обоих случаях опасные явления не прогнозировались региональными управлениями гидрометслужбы (УГМС). Всего выявлено

6 ветровалов от вспышки смерчей 4.06.2018 г. на общей площади 213,8 га, из которых 4 включено в базу данных (имеет площадь более 5 га). В случае 13.09.2018 г. выявлено 9 ветровалов на общей площади 257,8 га, из которых 6 классифицированы как смерчевые (179,5 га) и 3 – как шкваловые (78,3 га). Более подробная характеристика смерчей, включая определение их интенсивности, приведена в работе (Шихов и др., 2020).

Условия возникновения вспышек смерчей 4.06.2018 и 13.09.2018 имели как общие черты, так и некоторые различия. Так, оба случая возникли на фоне зональных процессов, под влиянием достаточно глубоких (атмосферное давление в центре < 985 гПа) циклонов североатлантического происхождения, которые находились в стадии максимального развития. Центр циклона в первом случае находился над юго-восточной частью Архангельской области, а во втором – над северо-востоком Республики Коми. Конвекция развивалась в умеренной воздушной массе с температурой на изобарической поверхности  $AT_{850} + 8...+10^{\circ}\text{C}$  и влагосодержанием около 20 мм. При значительной облачности максимальная температура у земли составляла всего  $+16...+18^{\circ}\text{C}$ , но при этом дефицит точки росы не превышал  $3-6^{\circ}\text{C}$ . Это обусловило низкий уровень конденсации – одно из важнейших условий, необходимых для формирования смерчей (Taszarek et al., 2020б).

В случае 13.09.2018 г., в отличие от 04.06.2018 г., циклон имел две фронтальные системы, причем смерчи сформировались не на основном, а на вторичном холодном фронте, и температурный контраст в зоне фронта на  $AT_{850}$  не превышал  $4^{\circ}\text{C}/500$  км. Смерчи 04.06.2018 г. сформировались в теплом секторе циклона относительно недалеко от точки окклюзии, при той же величине горизонтального градиента температуры ( $4^{\circ}\text{C}/500$  км).

По данным аэрологического зондирования на станциях 27199 Киров (4.06.2018) и 28225 Пермь (13.09.2018) энергия неустойчивости в обоих случаях была равна нулю. При этом наблюдался упорядоченный сдвиг ветра – плавный рост скорости ветра с высотой, сопровождающийся изменением его направления с юго-западного на западное. Однако сумма скоростей ветра на изобарических поверхностях 850, 700 и 500 гПа существенно различалась: 4.06.2018 г. она составляла 51,5 м/с, а 13.09.2018 г. – 85 м/с, что для теплого периода является экстремально высоким значением. В обоих случаях наблюдалось совпадение вершины приземного теплого сектора циклона с осевой частью струйного течения в средней и верхней тропосфере, однако в случае 13.09.2018 г. струйное течение было более мощным.

Значения конвективных параметров, рассчитанные по данным ERA5, были сопоставлены с медианными значениями по выборке смерчей, представленными на рис. 4.9. Прежде всего, оба случая выделяются очень низкими значениями CAPE, в несколько раз меньше медианного для смерчей (табл. 4.7). Соответственно, все индексы, связанные с CAPE, в таких условиях также имели низкие значения, особенно SCP, SHIP и EHI. Это указывало на низкую вероятность возникновения долгоживущих штормов в таких условиях (что соответствует данным наблюдений). Уровень конденсации был близок к медианным значениям для случаев со смерчами (возможно, вследствие его завышения по данным реанализа), а уровень свободной конвекции – существенно ниже, что объясняется слабой неустойчивостью. При этом сдвиг ветра, особенно DLS, превышал медианные значения для случаев со смерчами. В обоих случаях DLS был существенно выше, чем MLS, что отражает рост скорости ветра с высотой в средней тропосфере.

Таким образом, выявлены следующие ключевые особенности, характерные для возникновения смерчей при слабой неустойчивости и сильном сдвиге ветра, которые должны учитываться при их прогнозе:

- Совпадение теплого сектора циклона вблизи точки окклюзии с высотной фронтальной зоной.
- Сильный вертикальный сдвиг ветра с возможным изменением его направления с высотой по часовой стрелке, скорость ветра в средней тропосфере  $\geq 25$  м/с.
- Низкий дефицит влажности в приземном слое атмосферы (не более  $5^\circ\text{C}$ ), что обуславливает низкий уровень конденсации.

Таблица 4.7  
Значения диагностических переменных  
при возникновении смерчей 04.06.2018 и 13.09.2018

Краткое наименование индекса и единица измерения	Значения индексов для самого сильного смерча		Медианное значение по выборке случаев смерчей (рис. 4.9)
	04.06.2018, 14.00 ВСВ	13.09.2018, 14.00 ВСВ	
ML CAPE, Дж/кг	145	184	785
ML CIN, Дж/кг	-20	-7	-21
ML LCL, м	811	890	809
ML LFC, м	1624	1432	2264
PW, мм	22,3	19,8	36,6
LLS, м/с	11,9	16,0	14,4
MLS, м/с	19,1	28,3	19,3
DLS, м/с	27,9	42,5	24,5
SRH <sub>0-3 км</sub> , м <sup>2</sup> /с <sup>2</sup>	188	175	236
SRH <sub>0-3 км</sub> , м <sup>2</sup> /с <sup>2</sup>	133	120	179
SWEAT, безразмерный	201	331	367
SCP	0,71	0,79	4,20
STP	0,25	0,20	0,55
SHIP	0,04	0,07	0,35
ML WMAXSHEAR, безразмерный	389	513	847
ML EHI <sub>0-3 км</sub> , безразмерный	0,17	0,21	0,96

### **4.3. Моделирование и прогноз шквалов и смерчей, вызывающих крупные ветровалы, с помощью региональной модели атмосферы WRF**

Региональные модели численного прогноза погоды (ЧПП) представляют собой мощный инструмент для исследования и краткосрочного прогнозирования конвективных явлений, включая шквалы и смерчи. Их важнейшей особенностью является возможность прямого (без использования параметризаций) воспроизведения мезомасштабных процессов в атмосфере, в том числе глубокой конвекции (Weisman et al., 2008). До недавнего времени понятия «региональная модель атмосферы» и «мезомасштабная модель атмосферы» можно было рассматривать как синонимы. Но в последние годы благодаря росту производительности вычислительных систем пространственное разрешение глобальных моделей ЧПП достигло 9–13 км. В результате они также способны воспроизводить процессы мезо- $\alpha$  масштаба, и частично мезо- $\beta$  масштаба (Varentsov et al., 2018; Ривин и др., 2019).

Впервые прогнозы конвективных явлений на основе прямого моделирования с пространственным разрешением несколько км были получены в начале XXI века для территории США, на основе мезомасштабной модели атмосферы ARPS (Xue et al., 2003). В настоящее время список публикаций по данному направлению насчитывает многие сотни наименований. В частности, с середины 2000-х гг. мезомасштабные модели ЧПП используются для краткосрочного прогноза риска возникновения смерчей в США (Kain et al., 2006). В рамках ежегодного эксперимента NOAA Hazardous Weather Testbed Spring Experiment были получены первые численные прогнозы с высоким разрешением в реальном времени с помощью мезомасштабной модели атмосферы WRF (Kain et al., 2006; 2008). Дальнейшие исследования были направлены, в частности, на разработку методов идентификации мезоциклонов в выходных данных модели ЧПП высокого разрешения (Sobash et al., 2011, 2016; Clark et al., 2013); оценку чувствительности модели к схемам параметризации микрофизики облаков и осадков (Stratman et al., 2017), ассимиляции в моделях данных систем грозопеленгации (Fierro et al., 2012), а также спутниковых и радиолокационных наблюдений (Вельтищев и др., 2012; Jones et al., 2015).

Среди региональных моделей ЧПП наиболее широко используется модель Weather Research and Forecasting (WRF), разработанная совместными усилиями Национального центра атмосферных исследований США (NCAR) и ряда других

организаций. Современная (4-я) версия модели описана в работе (Powers et al., 2017), описание модели на русском языке приведено в обзоре (Вельтищев и др., 2010). Преимуществами модели WRF является открытый исходный код с возможностью встраивания новых параметризаций физических процессов, и качественная документация. Модель широко используется для исследования и прогнозирования шквалов и смерчей во всем мире (см. напр. Kain et al., 2006; Weisman et al., 2008; Litta et al., 2012; Matsangouras et al., 2014; Das et al., 2016; León-Cruz et al., 2017; Taszarek et al., 2019).

В России также проводится множество исследований КОЯП с применением региональных моделей ЧПП. В основном используется модель WRF (Вельтищев и др., 2011, 2012; Калинин и др., 2017–2019, Шихов, Быков 2015, 2016; Быков, Шихов, 2018; Новицкий и др., 2016, 2018; Рубинштейн и др., 2019; Романский и др., 2020; Chernokulsky et al., 2020b), а также система ЧПП COSMO-Ru, которая является основной в Гидрометцентре РФ (Вильфанд и др., 2010; Дмитриева, Песков, 2013, 2016; Ривин и др., 2019). В большинстве работ анализируется воспроизводимость отдельных случаев КОЯП. При этом значительно меньше внимание уделяется, например, оценке ложных тревог, т.е. случаям, когда модель воспроизвела опасное явление, но фактически оно не наблюдалось (Калинин и др., 2021б).

В настоящее время основной проблемой моделирования и прогноза шквалов и смерчей является точность воспроизведения места и времени возникновения МКС и связанных с ними КОЯП, а также траекторий их прохождения. В частности, модель WRF с шагом сетки 1–3 км успешно воспроизводит МКС, генерирующие смерчи, а также и сами мезовихри, но траектория и время их прохождения существенно отличаются от наблюдений (см. напр. Das et al., 2016; Taszarek et al., 2019; Chernokulsky et al., 2020b). Это смещение сохраняется даже при моделировании с шагом сетки менее 100 м, когда торнадо в явном виде воспроизводится моделью (Schenkman et al., 2014). Несмотря на взрывной рост вычислительной мощности компьютеров и прогресс в развитии ЧПП, краткосрочный прогноз сильных шквалов и смерчей с достаточной точностью в пространстве и времени остается проблемой. При этом для сильных шквалов с большим охватом территории есть примеры успешного воспроизведения места и времени возникновения (Taszarek et al., 2019; Калинин и др., 2019, 2021).

### Моделирование МКС с сильными шквалами и смерчами в диагностическом режиме

В настоящем разделе рассмотрена методика и результаты моделирования случаев МКС с сильными шквалами и смерчами, которые вызвали крупные ветровалы на ЕТР в 1986–2020 гг., с помощью модели WRF. Критериями отбора случаев была общая площадь ветровалов, связанных с прохождением МКС свыше 2 тыс. га, а также протяженность полосы разрушений  $\geq 200$  км.

Таблица 4.8

Настройки модели WRF для проведения численных экспериментов

Характеристика модели	Значение (настройка)
Горизонтальный шаг сетки	3 км
Координаты центра домена	57° с.ш., 43° в.д.
Число узлов сетки	900×700
Число вертикальных уровней	51
Рельеф	U.S. Geological Survey (USGS) DEM (30s)
Продолжительность моделирования	27 ч, от 00 UTC
Временной шаг вывода данных	1 ч
Динамическое ядро	Advanced Research WRF (ARW), non-hydrostatic
Временной шаг интегрирования	адаптивный
Начальные и граничные условия	Реанализ CFS (0,5°) и ERA5 (0,25°)
Микрофизика облачности	Схема Томпсона
Параметризация пограничного слоя	Yonsei University scheme
Параметризация процессов подстилающей поверхности	Модель Noah
Коротковолновая и длинноволновая радиация	Rapid Radiative Transfer Model (RRTM)
Приземный слой	Схема Мони́на-Обухова
Конвекция	Прямое моделирование (без параметризации)

Моделирование развития шквалов производилось с помощью модели WRF версии 4.2 с динамическим ядром ARW (Advanced Research WRF). Программный комплекс модели установлен на высокопроизводительной рабочей станции. Принятые настройки модели описаны в табл. 4.8. Модель запускалась на начальных данных систем реанализа CFSR (Saha et al., 2010) и ERA5 (Hersbach et al., 2020). Поскольку 12 случаев шквалов относятся к 10 различным датам, всего проведено 20 численных экспериментов (по 10 на начальных данных CFSR и ERA5).

Учитывая большую протяженность пути МКС, вызвавших шквалы (в ряде случаев она превышала 500 км), было принято решение отказаться от использования вложенных доменов и использовать один домен с шагом сетки 3 км, что достаточно для воспроизведения МКС масштаба мезо- $\alpha$ , с которыми были связаны все рассматриваемые случаи шквалов. Как показано в работах (Калинин и др., 2017, 2019), модель в такой конфигурации реалистично воспроизводит скорости ветра при шквалах, охватывающих обширные территории. Также, похожая конфигурация используется в оперативной версии модели WRF в США (Kain et al., 2006; 2008).

Для оценки достоверности результатов моделирования использованы три источника данных. Расчетные порывы ветра на высоте 10 м и количество осадков были сопоставлены с наблюдениями метеостанций, а также с контурами ветровалов, полученными из базы данных (см. главы 2-3), и иными сведениями об ущербе от шквалов и смерчей. Характеристики МКС по модели (температура ВГО, расчетная композитная отражаемость) сопоставлены со спутниковыми снимками SEVIRI/Meteosat, а при их отсутствии – Terra/Aqua MODIS. Существенным ограничением является недоступность данных сети ДМРЛ, которые являются основными при оценке результатов моделирования конвективных явления (см. напр. Вельтищев и др., 2011; Kain et al., 2006; 2008; Taszarek et al., 2019). Однако совокупность данных о ветровалах и спутниковых снимков МКС позволяет с приемлемой точностью оценить траекторию и время прохождения шквала или смерча даже при отсутствии информации с ДМРЛ.

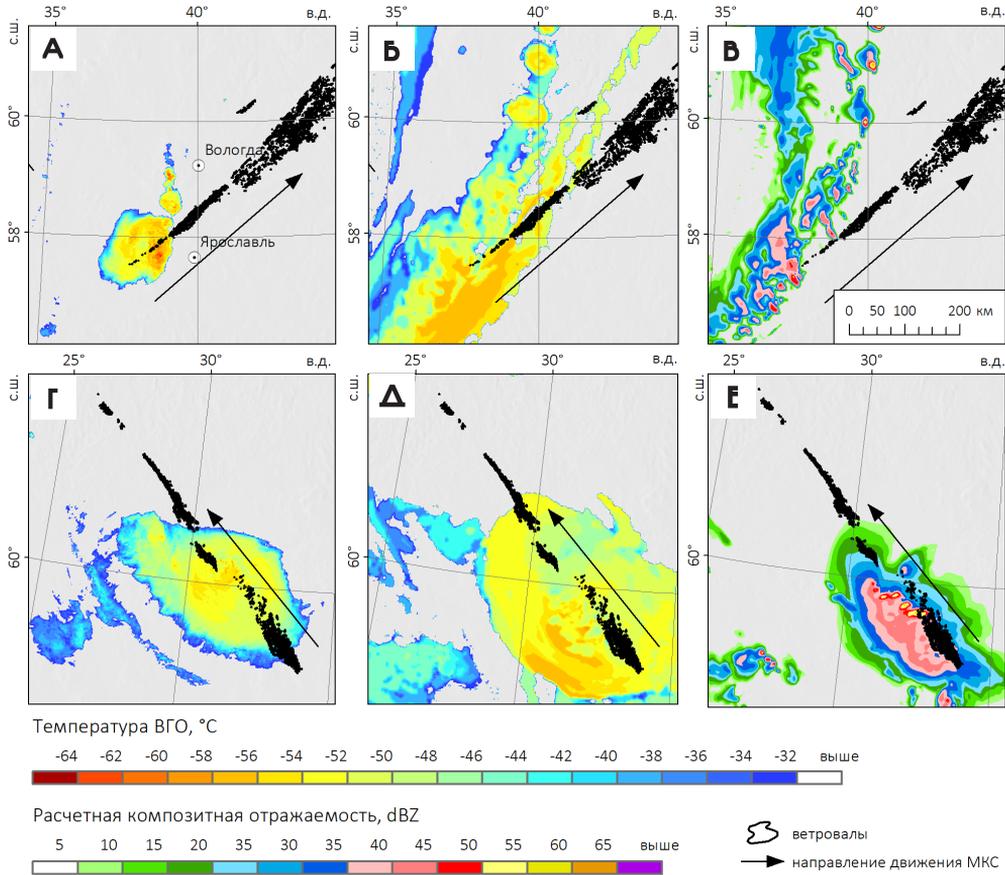
Оценка достоверности результатов моделирования выполнена с применением объектно-ориентированного подхода (Вельтищев и др., 2011). В качестве объектов рассматривались воспроизведенные моделью МКС, зоны шквалов, сильных ливней, а также мезоциклоны. Траектории и время прохождения объектов сопоставлены со снимками Meteosat-8 и с контурами ветровалов (рис. 4.13). Мезоциклоны в выходных данных модели выявлены

по наличию циклонических возмущений в поле приведенного атмосферного давления, имеющих диаметр 10–50 км, а также по значениям параметра SRH в слое 0–3 км, превышающим  $1000 \text{ м}^2/\text{с}^2$  (рис. 4.14).

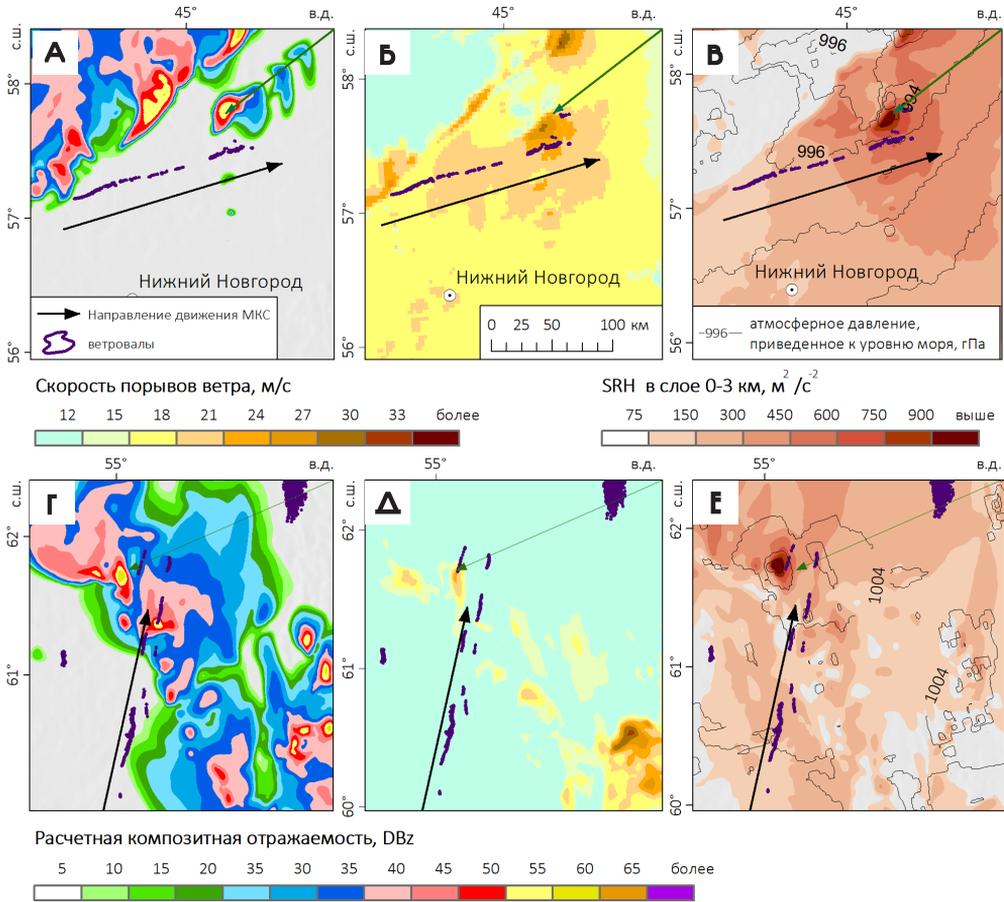
Для расчетных траекторий МКС рассчитаны ошибки по положению и по времени прохождения связанных с ними явлений (табл. 4.9). Ошибка по положению – это расстояние между фактической и прогностической траекторией движения МКС, а смещение по времени – соответствующая разница во времени прохождения МКС (отрицательная – если явление прогнозировалось раньше, чем наблюдалось и положительная – в обратном случае). Максимальные значения интенсивности явлений (порывов ветра, количества осадков и композитной отражаемости) определены в радиусе 100 км от полосы разрушений (ветровала). Если МКС не воспроизводится моделью, то величина смещения не оценивается, и в соответствующей графе табл. 4.9 указан прочерк.

Также для каждого случая оценивалось, как модель воспроизводит время достижения максимальной интенсивности и тип МКС. Первая характеристика определена по времени, когда модель воспроизводит самые сильные порывы ветра. Если модель не воспроизвела МКС, данная характеристика не оценивалась (а табл. 4.10 указан прочерк). Имеются и альтернативные случаи. Например, в случае 16.06.2009 г. ошибка по времени оказалась положительной либо отрицательной для разных ветровалов, поэтому точность определена как  $\pm 1$  ч. В случае 29.07.2010 МКС развивалась как «пульсирующий шторм» (Lompar et al., 2018), который периодически ослабевал и усиливался, при этом максимум интенсивности также не мог быть однозначно определен.

Воспроизведение моделью морфологических особенностей МКС оценивалось на основе сопоставления со снимком Meteosat, тип МКС определен по классификации (Maddox, 1980). В случае с суперячейками, успешность воспроизведения оценивалась как по геометрическим признакам, так и по наличию мезоциклона в выходных данных модели, который можно сопоставить с фактическими данными о ветровалах (рис. 4.14).



**Рис. 4.13.** Сопоставление результатов моделирования МКС, вызвавших долгоживущие шквалы 27.06.2010, 10.00 ВСВ (а–в) и 29.07.2010, 19.00 ВСВ (г–е) со спутниковыми снимками Aqua/MODIS: температура ВГО по спутниковым данным (а, г), температура ВГО по модели WRF (б, д) и расчетная композитная отражаемость по модели WRF (в, е).



**Рис. 4.14.** Воспроизведение моделью WRF мезоциклонов 13.06.2010, 15.00 ВСВ (а-в) и 07.06.2009, 11.00 ВСВ (г-е). Показаны поля композитной отражаемости, скорости порывов ветра на высоте 10 м, приведенного атмосферного давления и SRH в слое 0–3 км.

Таблица 4.9  
Оценка достоверности результатов моделирования МКС, вызвавших крупные ветровалы на ЕТР. Выделены результаты наиболее успешных численных экспериментов

Дата, время события (BCB)	Тип МКС	Тип явления	Суммарная длина полосы разрушений (км) и площадь ветровалов (км <sup>2</sup> )	Начальные данные для запуска модели WRF	Макс. порыв ветра (м/с), факт/ модель	Макс. количество осадков за 12 ч (мм), факт/ модель	Макс. композитная отражаемость (DBz), модель	Смещение по траектории, км	Смещение по времени прохождения и достижения макс. интенсивности (ч)	Воспроизведение типа МКС**
										1
07.06.2009, 09.30 – 12.00	СЯ*	Смерчи, шквалы	275/ 28.8	CFS	-/22	-/20	62	90-130	0,0/-2,0	1
				ERA5	-/22	-/33	60	0-50	0,5/1,0	1
07.06.2009, 12.00 – 14.00	неопр.	Шквал, смерчи	75/ 67.9	CFS	-/30	-/38	61	75-100	0,0/1,0	-
				ERA5	-/32	-/31	59	0	2,0/1,0	-
16.06.2009 14.00 – 17.00	ЛШ*	Шквалы, смерчи	371/ 132.0	CFS	30/29	51/67	63	0-50	±1,0/-2,0	1
				ERA5	30/26	51/143	61	30-60	1,0/0,0	1
12.06.2010 10.30 – 16.00	СЯ транс-форм. в МКК*	Шквалы, смерчи	405/ 51.7	CFS	-/25	15/14	61	40-180	1,5/2,0	0
				ERA5	-/29	15/31	63	0	1,0/0,0	0

Воспроизведение типа МКС**	1	0	0	0	1	1	0	0
Смещение по времени прохождения и достижения макс. интенсивности (ч)	0,0/1,0	0,0/-0,5	-0,5/3,0	0,0/3,0	-0,5/	±0,5/	0,0/2,0	+1,0/
Смещение по траектории, км	30	10	0-30	30-100	0-70	0-35	10-90	80-150
Макс. композитная отражаемость (DBz), модель	59	64	58	56	57	63	59	47
Макс. количество осадков за 12 ч (мм), факт/ модель	36/37	36/40	26/17	26/19	17/40	17/39	10/16	10/5
Макс. порыв ветра (м/с), факт/ модель	28/27	28/27	32/31	32/30	30/36	30/41	20/17	20/13
Начальные данные для запуска модели WRF	CFS	ERA5	CFS	ERA5	CFS	ERA5	CFS	ERA5
Суммарная длина полосы разрушений (км) и площадь ветровалов (км <sup>2</sup> )	480/ 19.2		533/ 502.5		626/ 755.5		305/ 2926	
Тип явления	Шквалы, смерчи		Шквал		Шквал		Шквал	
Тип МКС	ЛШ, СЯ		СЯ и ЛШ		МКК		МКК	
Дата, время события (BCB)	13.06.2010 11.30 – 14.30		27.06.2010 09.00 – 15.00		29.07.2010 16.00 – 23.00		10.08.2010 04.00 – 07.30	

Дата, время события (BCV)	18.07.2012 10.00 – 13.00	МКК	Тип явления	Шквал	Суммарная длина полосы разрушений (км) и площадь ветровалов (км <sup>2</sup> )	245/ 90.5	Начальные данные для запуска модели WRF	CFS	Макс. порыв ветра (м/с), факт/ модель	24/36	27/41	Макс. композитная отражаемость (DBz), модель	60	Смещение по траектории, км	0-30	Смещение по времени прохождения и достижения макс. интенсивности (ч)	+1,0/ +1,0	0	Воспроизведение типа МКС**	0
							ERA5			24/32	27/31	64	0-30		+3,5/ +1,0	0				
							CFS			25/31	36/27	55	0-60		-1,5/0,0	0				
							ERA5			25/28	36/33	61	10-70		+1,5/ +1,5	0				
							CFS			22/28	54/83	61	0-25		0,0/0,0	1				
							ERA5			22/27	54/46	63	0-30		0,0/-2,0	1				
							CFS			33/37	26/39	61	30-90		-2,0/- 1,0	0				
							ERA5			33/29	26/89	65	50-110		0,5/0,0	0				

Примечание. \*СЯ – суперячейка, ЛШ – суперячейка, ЛШ – линия шквалов, МКК – мезомасштабный конвективный комплекс.  
 \*\*на основе сопоставления со снимком Meteosat. 1 – тип МКС совпадает со спутниковыми данными,  
 0 – не совпадает, прочерк означает отсутствие спутниковых данных.

Описанная схема оценки достоверности результатов моделирования не лишена некоторых недостатков. В частности, не были сопоставлены фактическая и расчетная продолжительность жизни МКС, что связано с отсутствием проверочных данных для ряда случаев (7.06.2009, 16.06.2009, 18.07.2012), для которых отсутствуют снимки Meteosat, также не оценивалось наличие ложных тревог (МКС, которые воспроизводятся моделью, но фактически их не было).

Качество воспроизведения моделью характеристик МКС не во всех экспериментах было удовлетворительным. Лишь в 4-х из них модель успешно воспроизвела МКС и сами явления по интенсивности, точности в пространстве и времени, а также корректно воспроизвела тип МКС (табл. 4.9). В то же время модель вообще не воспроизводит МКС, или не воспроизводит порывы ветра выше 25 м/с всего в 4-х случаях. Ниже перечислены основные ограничения, характерные для результатов численных экспериментов.

Основной проблемой является занижение моделью максимальной скорости ветра. В 14 из 24 случаев она составила менее 30 м/с, в том числе в 4-х случаях – менее 25 м/с, тогда как масштаб повреждений лесного покрова по всем случаям указывает на порывы ветра 30 м/с и более. Также отмечается занижение площади воздействия шквалов. Так, в случаях 12.06.2010 и 13.06.2010 модель воспроизводит лишь локальные зоны с порывами ветра > 25 м/с, способными вызвать ветровал, фактически же разрушительные шквалы охватывали обширные территории. Самая сильная недооценка скорости ветра отмечалась для случая 10.08.2010, когда модель воспроизвела МКС с порывами ветра не более 14–17 м/с, вне зависимости от начальных условий. Вероятно, это обусловлено занижением степени неустойчивости воздушной массы в утренние часы, когда и наблюдался этот случай шквала. Еще в одном случае (7.06.2009) занижение скорости ветра обусловлено значительным смещением фронтальной зоны в начальных данных (CFSR и ERA5) к востоку относительно ее фактического положения. Другие МКС, которые также вызвали сильные шквалы и смерчи в этот день, воспроизведены моделью более успешно, связанные с ними порывы ветра по модели превышают 30 м/с.

Скорость ветра по модели завышена для случая 18.07.2012 г. (запуск модели на начальных данных CFS). Здесь модель воспроизводит обширные зоны со шквалами  $\geq 30$  м/с в центральных районах Пермского края, где фактически ветровалы не были зафиксированы, и шквалы имели локальный характер. В целом площадь зоны с сильными шквалами в этом эксперименте существенно превысила фактическую.

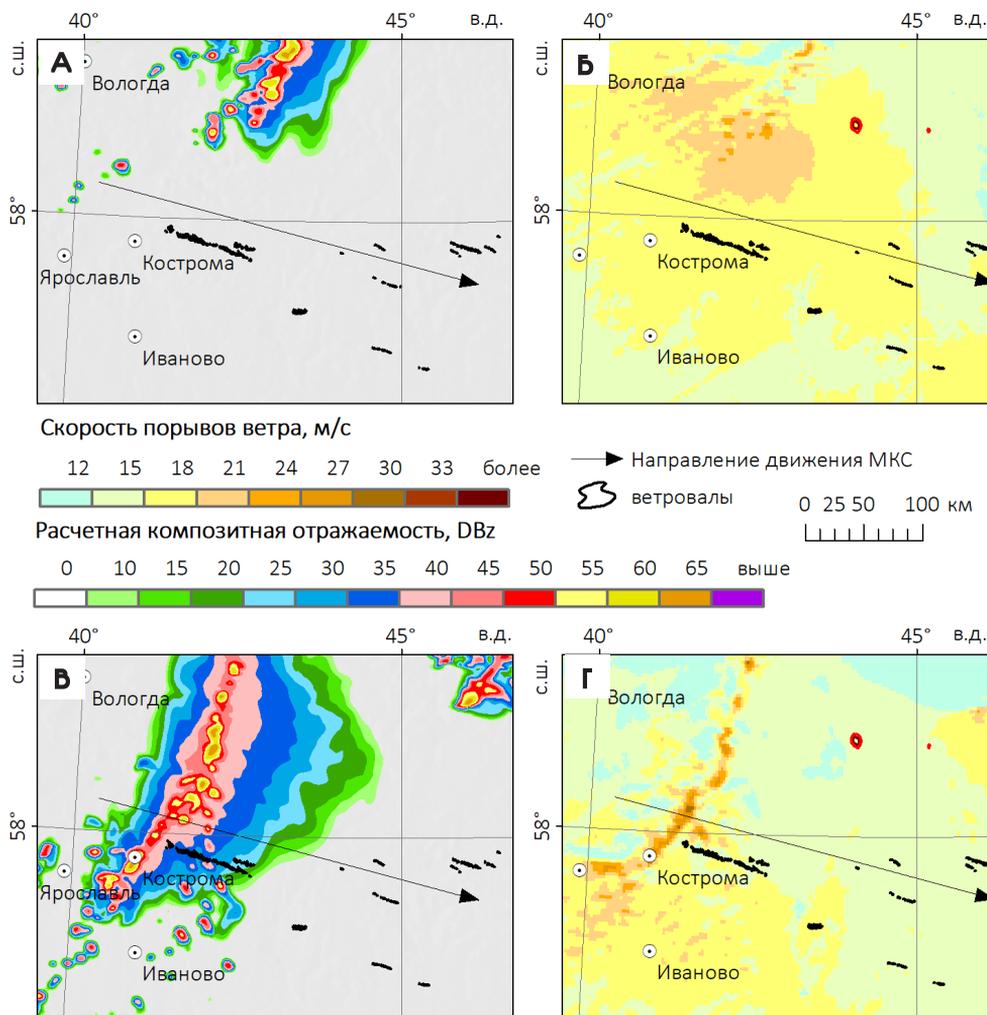
Модель некорректно воспроизводит морфологические особенности МКС в

13 из 22 оцениваемых случаев. Например, в ряде случаев (12.06.2010, 27.06.2010 и 18.07.2012) модель воспроизводит линию шквалов вместо доминирующей квазиокруглой МКС (МКК или суперячейки), что может сопровождаться занижением интенсивности явления (пример приведен на рис. 4.13 а–в). Но имеются и примеры успешного воспроизведения МКС разных типов: линий шквалов (16.06.2009, 2.08.2017), МКК (29.07.2010) и суперячеек (7.06.2009, 13.06.2010). Результаты воспроизведения моделью суперячеек показаны на рис. 4.14 (а–в), МКК – на рис. 4.13 (г–е) и 4.16, линейной МКС – на рис. 4.15.

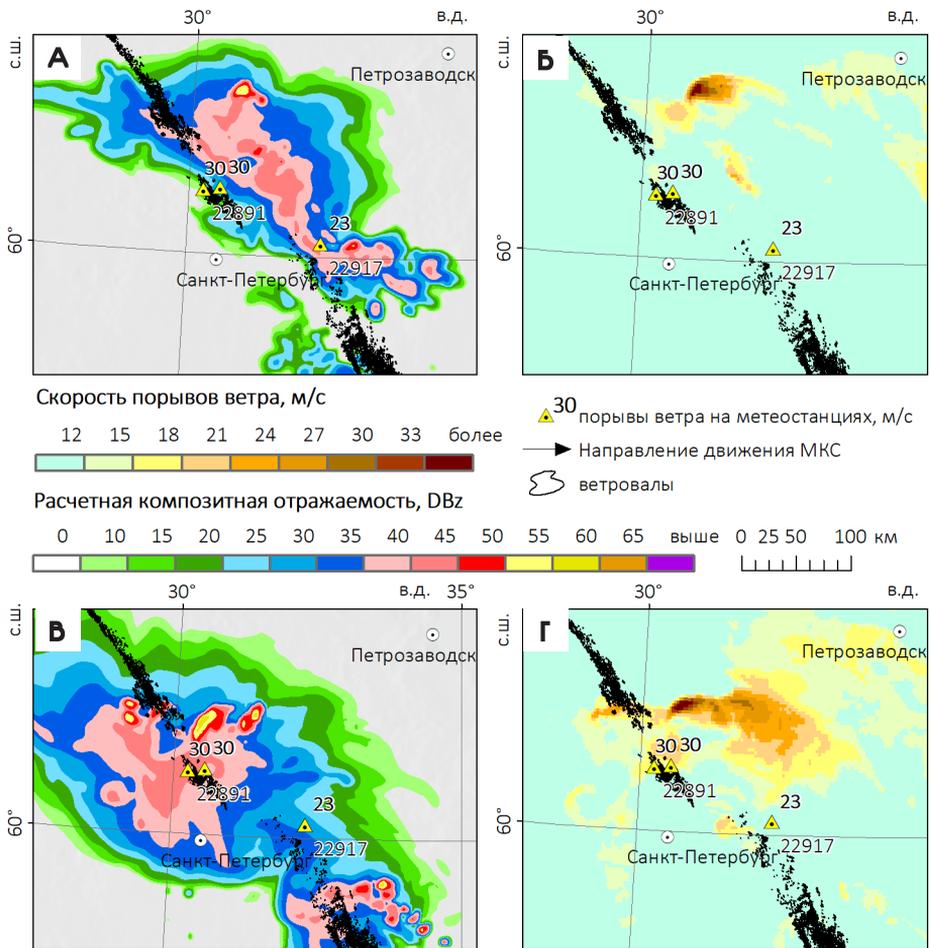
Точность по времени и по пространству в большинстве случаев оказалась удовлетворительной. Так, лишь в одном случае смещение по времени превышало 3 ч, еще в двух случаях такое смещение отмечено по времени максимального развития явления. Смещение траектории МКС относительно фактической превышает 50 км (в среднем по пути движения МКС) лишь в 7 из 24 случаев, что можно считать успешным результатом. Если рассматривать точность по времени и по пространству совместно, то успешными можно считать 13 из 24 численных экспериментов, в которых ошибка по времени не превышает 1,5 ч, а пространственное смещение в среднем не превышает 50 км.

Важнейшим фактором, определяющим качество воспроизведения конвективных явлений моделью WRF, является выбор начальных данных для ее запуска (Калинин и др., 2017, 2019). Неудовлетворительные результаты моделирования часто связаны со смещением фронтальных зон в начальных данных реанализа или глобальных моделей ЧПП относительно их фактического положения. Учитывая тот факт, что реанализ ERA5 имеет ряд преимуществ перед CFSR и другими реанализами (Hersbash et al., 2020), можно было ожидать, что в экспериментах на начальных данных ERA5 произойдет значительное повышение точности результатов моделирования. Однако такой однозначной зависимости выявлено не было.

Значительное преимущество результатов моделирования на начальных данных ERA5 в сравнении с данными CFSR отмечается, если сравнивать их в терминах смещений по пространству. Так, среднее (медианное) смещение по пространству составило 46(33) и 27(18) км при запуске модели WRF на начальных данных CFSR и ERA5 соответственно. При этом среднее (медианное) смещение по времени составило 0,7(0,5) и 0,9(0,7) ч соответственно, т.е. небольшое преимущество выявлено при запусках модели по данным CFSR. Также при запуске модели на начальных данных ERA5 в ряде случаев (12.06.2010, 27.06.2010, 29.07.2010) адекватно воспроизводится скорость ветра при шквале и площади их воздействия (рис. 4.15 и 4.16).



**Рис. 4.15.** Результаты моделирования МКС со шквалами и смерчами 12.06.2010 г. (13.00 ВСУ) с помощью модели WRF на основе начальных данных CFSR (а, б) и ERA5 (в, г).



**Рис. 4.16.** Результаты моделирования МКС с долгоживущим шквалом 29.07.2010 г. (20.00 ВСВ) с помощью модели WRF на основе начальных данных CFSR (а, б) и ERA5 (в, г).

Однако и в экспериментах с начальными данными ERA5 были получены неудовлетворительные результаты для случаев МКС 10.08.2010, 18.07.2012 и 8.07.2020. Также модель WRF при запуске на начальных данных ERA5 не воспроизводит мезоциклоны 12.06.2010 и 13.06.2010, с которыми были связаны значительные смерчи. Максимальное количество осадков по модели WRF в 7 случаях оказалось больше при использовании начальных данных ERA5, а в 5 случаях – в экспериментах на данных CFSR, так что однозначно выделить особенности тех или иных начальных данных здесь также не удается.

### **Прогноз МКС с сильными шквалами и смерчами**

В 2020–2021 гг. с помощью модели WRF были получены экспериментальные прогнозы случаев КОЯП для Уральского региона и прилегающих областей ЕТР в течение всего летнего периода. Программный комплекс модели установлен на высокопроизводительной рабочей станции. Запуск модели WRF производился ежедневно на начальных данных прогноза GFS/NCEP с шагом сетки  $0,25^\circ$  от 0 или 12 ч ВСВ, на срок 27 ч. Для повышения устойчивости модели в первые часы прогноза реализовано предварительное усвоение данных объективного анализа за 12 ч, предшествующие запуску модели.

В 2020 и 2021 гг. использовалась разная конфигурация модели для получения прогнозов. Основным ее отличием от конфигурации для диагностического режима (табл. 4.10), помимо выбора начальных условий, было положение точки центра домена (соответствующее г. Пермь). Также в 2020 г. использовались два вложенных домена (внешний – с шагом 9 км и вложенный – с шагом 3 км), а в 2021 г. – один домен с шагом сетки 5 км.

Конфигурация модели для получения прогнозов КОЯП в 2020 и 2021 гг. также различалась. В 2020 г. моделирование конвекции производилось напрямую (без параметризации), что приводило к частому появлению ложных тревог», т.е. модель воспроизводила МКС там, где они фактически не наблюдались (пример на рис. 4.17).

В 2021 г. для минимизации числа таких ложных тревог была включена масштабируемая (scale-dependent) параметризация конвекции. Традиционно конвекция параметризуется при моделировании с шагом  $\geq 10$  км, в частности в глобальных моделях ЧПП. При шаге сетки 3–8 км в региональных моделях ЧПП конвекция обычно моделируется напрямую, хотя такое разрешение позволяет лишь частично воспроизвести конвективные процессы.

Таблица 4.10  
 Конфигурация модели WRF, использованная для экспериментального  
 краткосрочного прогноза КОЯП по территории Уральского региона  
 в 2020 г и 2021 гг.

Характеристика модели	Принятая настройка в 2020 г.	Принятая настройка в 2021 г.
Начальные и граничные условия	Прогноз GFS с шагом сетки 0,25° и шагом по времени 1 ч	То же
Внешний домен (шаг сетки и число узлов)	9 км/333×333	Один домен 5 км/600×450
Вложенный домен (шаг сетки и число узлов)	3 км/400×400	
Координаты центра домена	58° N, 56° E	То же
Число вертикальных уровней	48	То же
Модель рельефа	U.S. Geological Survey (USGS) DEM (30s)	То же
Максимальная заблаговременность прогноза	39 ч	То же
Временной шаг вывода данных	1 ч	То же
Динамическое ядро	ARW	То же
Шаг интегрирования по времени	Адаптивный	То же
Микрофизика облачности	Схема Томпсона	То же
Планетарный пограничный слой	Схема Меллора-Ямады-Янича (Eta)	То же
Подстилающая поверхность	Модель Noah	То же
Коротковолновая и длинноволновая радиация	Схема GFDL (Eta)	То же
Приземный слой	Схема Мони́на-Обухова с вязким подслоем Карлсона-Боланда и стандартными функциями подобия	То же
Конвекция	Прямое моделирование (без параметризации) на обоих доменах	Модифицированная схема SAS

Данная проблема получила название «серой зоны» (Hong, Dudhia, 2012). Одним из путей ее решения является применение подхода «unified parameterization», который обеспечивает плавный переход от полностью параметризованного к явному моделированию конвективных процессов по мере увеличения разрешения (Arakawa, Wu, 2013). В качестве такой параметризации конвекции была выбрана модифицированная схема Аракавы-Шуберта, (Arakawa, Schubert, 1974), которая ранее использовалась в модели GFS/NCEP (Lim et al., 2014) и относительно недавно стала доступной в модели WRF. Она может применяться при моделировании с разным пространственным разрешением и позволяет повысить точность прогноза конвективных явлений за счет снижения числа ложных тревог, что показано, в частности, в работе (Kwon, Hong, 2017) применительно к ливневым осадкам.

Оценка прогноза в 2020 и 2021 г. была выполнена также разными способами. В 2020 г. оценивались только прогнозы случаев КОЯП, которые вызвали ветровалы или нанесли значительный ущерб (Калинин и др., 2021б). Оценка выполнена по той же схеме, которая использовалась для диагностического режима моделирования (п. 4.3.1). Прогнозы наиболее значимых случаев шквалов и смерчей, вызвавших крупные ветровалы, оцениваются в табл. 4.11.

Прогнозы, полученные в 2020 г., по степени достоверности воспроизведения МКС и интенсивности явлений сопоставимы с результатами моделирования других случаев МКС со шквалами и смерчами в диагностическом режиме (см. п. 4.3.1). Важно отметить, что МКС 27.06.2020 и 16.07.2020 были долгоживущими и относятся к масштабу мезо- $\alpha$ , и их жизненный цикл модель воспроизводит удовлетворительно. В то же время модель не воспроизвела суперячейку масштаба мезо- $\beta$ , вызвавшую смерч 30.07.2020 г. на северо-востоке Кировской области. Ошибки по положению и по времени для этого случая не вычислены.

В случае со шквалами и смерчами 27.06.2020 модель WRF существенно занижает скорость порывов ветра, особенно на участке холодного фронта вблизи точки окклюзии, где фактически и наблюдались наиболее сильные шквалы и смерчи, вызвавшие ветровалы. Также отмечается некоторое смещение траектории МКС по модели на юг от фактической траектории (в пределах 50 км). Максимальное количество осадков по модели в три раза больше, чем зафиксировали метеостанции, однако нужно учитывать, что метеостанции могли оказаться за пределами зон локальных сильных ливней.

Таблица 4.11

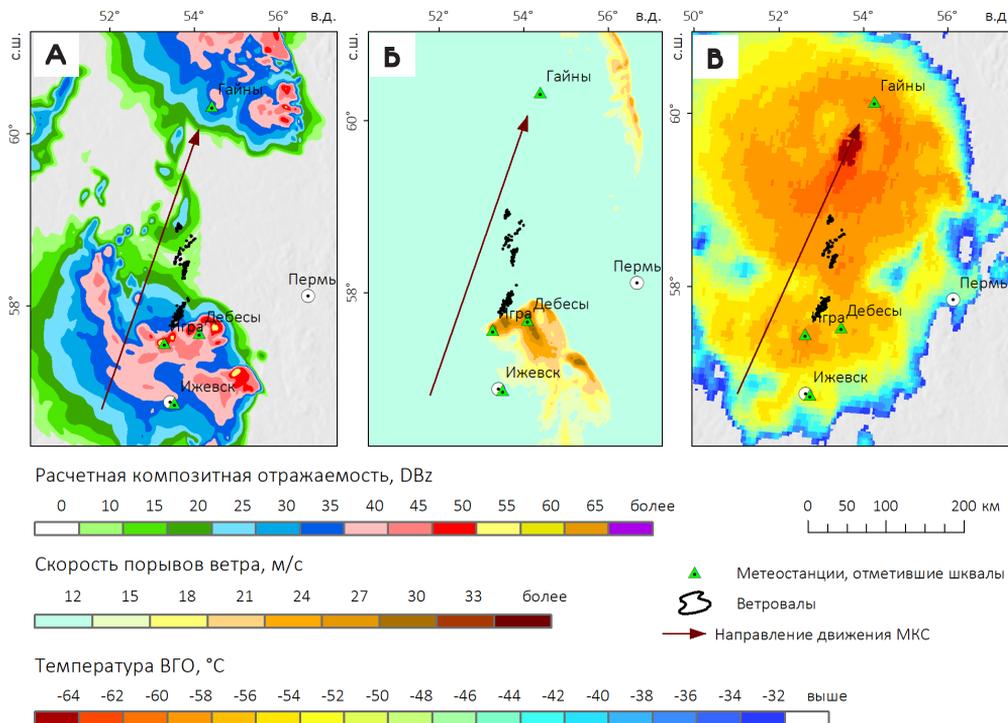
Оценка достоверности прогноза МКС, вызвавших крупные ветровалы на востоке ЕТР летом 2020 г. по модели WRF

Дата, время события (ВСВ)	Тип МКС	Тип явления	Суммарная длина полосы разрушений (км) и площадь ветровалов (км <sup>2</sup> )	Начальные данные для запуска модели WRF	Макс. порыв ветра (м/с), факт/модель	Макс. количество осадков за 12 ч (мм), факт/ модель	Макс. композитная отражаемость (DBz), модель	Смещение по траектории, км	Смещение по времени прохождения и достижения макс. интенсивности (ч)	Воспроизведение типа МКС
27.06.2020, 09.00 – 15.00	Ся транс-форм. в МКК*	Смерчи, шквалы	354/ 19,92	GFS	25/25	16/51	58	50	-1,5/0,0	1
16.07.2020 18.00 – 21.00	МКК	Шквалы	145/ 6,26	GFS	25/30	33/40	60	10	2,5/2,5	1
30.07.2020 15.30 – 16.00	Ся	Смерч	17/1,41	GFS	-/15	21/34	51	-/-	-/-	0

В случае 16.07.2020 г. по модели прогнозировалось прохождение сильного шквала через территорию Удмуртии с небольшим смещением к востоку относительно фактической траектории и максимальной скоростью ветра 30 м/с (рис. 4.17). На метеостанциях были отмечены порывы ветра до 25 м/с, однако наличие крупных ветровалов позволяет предположить, что максимальная скорость ветра была выше.

Прогноз данного случая по модели WRF имеет две неточности. Во-первых, отмечается значительная ошибка по времени (шквал прогнозировался на 2,5 ч позже, чем наблюдался), во-вторых, модель воспроизводит развитие еще одной линии шквалов вечером 16 июля над северо-востоком Кировской области и северо-западом Пермского края, которой фактически не было. Такие ложные тревоги при прогнозе шквалов по модели WRF могут быть связаны с неопределенностями при прогнозе процессов синоптического масштаба, либо

с воспроизведением конвекции в модели. Одним из способов их минимизации является использование масштабируемой параметризации конвекции, что и было сделано в 2021 г.



**Рис. 4.17.** Прогноз шквала 16.07.2020 г.: расчетная композитная отражаемость (а) и порывы ветра (б) по модели WRF в 22.00 ВСВ, и температура ВГО по снимку Meteosat-8 за этот же срок (в).

**Оценка числа пропусков и ложных тревог при прогнозе шквалов по модели WRF на примере 2021 г.**

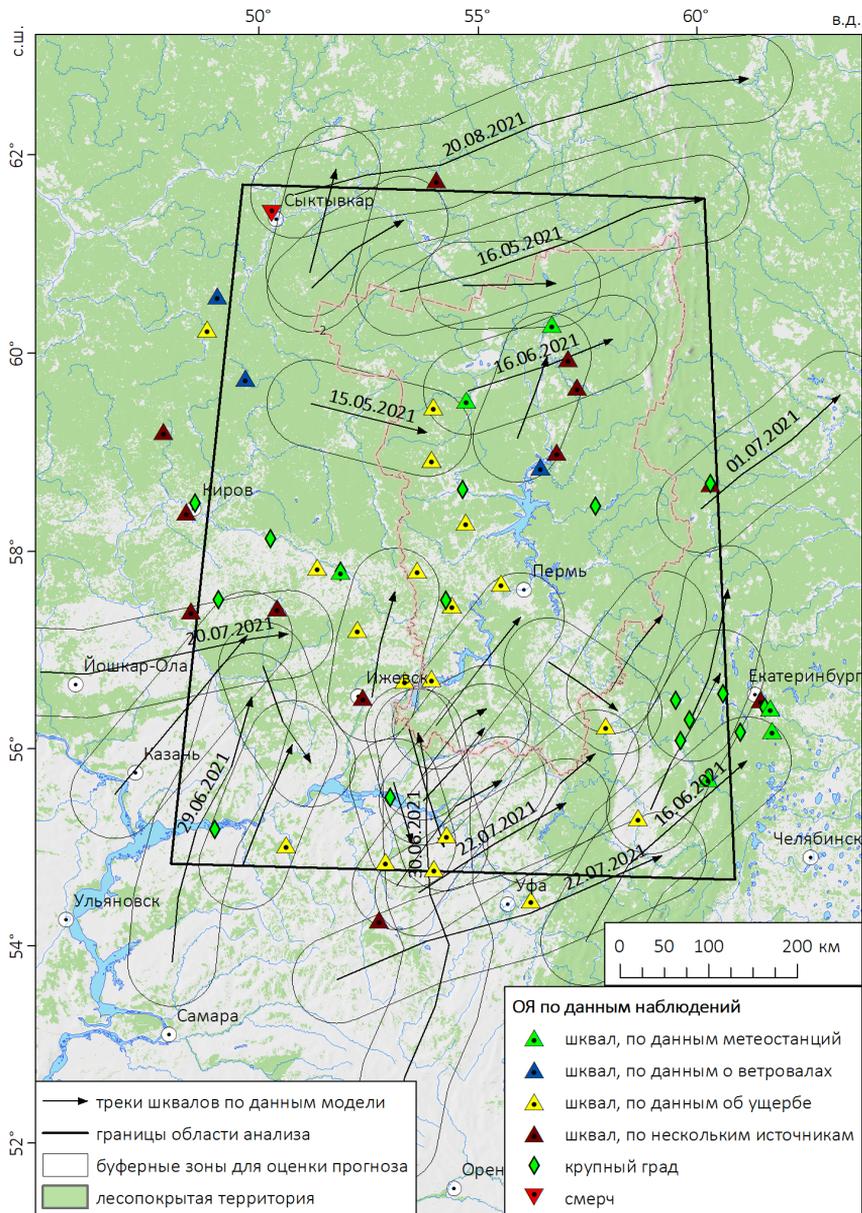
В 2021 г. была выполнена оценка достоверности прогнозов по модели WRF на основе ряда данных за весь теплый период, с определением числа пропусков (явлений, которые наблюдались, но не воспроизводятся моделью) и ложных тревог (явлений, которые воспроизводятся моделью, но фактически не наблюдались). Особенности конфигурации модели WRF, использованной в 2021 г., рассмотрены выше.

Оценка прогнозов выполнена для области, расположенной вблизи центра модельного домена (55–62° с.ш., 49–61° в.д.), включающей Пермский край и прилегающие территории (рис. 4.18). Продолжительность исследуемого периода составила 114 сут – с 4 мая по 25 августа 2021 г., когда в пределах региона по данным сети метеостанций и грозопеленгаторов наблюдались грозы. Оценивался прогноз двух видов КОЯП – шквалов с порывами ветра  $\geq 25$  м/с и сильных дождей ( $\geq 30$  мм/12 ч). Далее рассмотрен только прогноз шквалов как явления, вызывающего ветровалы.

Для оценки прогнозов шквалов был создан проверочный набор данных. В него включены сведения о случаях конвективных ОЯ, полученные по наблюдениям сети метеостанций, из опубликованных баз данных (Научно-технический журнал..., 2001–2021; European Severe Weather Database, 2021), из сообщений об ущербе, опубликованных в СМИ, а также ветровалы, выделенные по снимкам Sentinel-2. Всего проверочный набор включает 41 случай шквалов, 1 случай смерча и 16 случаев крупного града. Случаи крупного града не оценивались, но рассматривались как дополнительная информация. Случаи шквалов наблюдались в течение 23 различных дат, наибольшее число (6) отмечалось 04.08.2021 г.

Для каждого случая в выборке был определен источник данных – наблюдения метеостанций, сведения об ущербе или данные о ветровалах. Из 42 случаев 18 были зафиксированы метеостанциями, из них в 8 случаях скорость ветра достигала критерия ОЯ ( $\geq 25$  м/с). В 34 из 42 случаев получена информация о нанесенном ущербе для населенных пунктов и инфраструктуры, 6 шквалов вызвали ветровалы на площади от 20 га до 567 га (из них 3 случая были выявлены только по снимкам ветровалов). В 13 случаях шквалы были подтверждены по двум или трем источникам данных.

Также были выделены все случаи с сильными шквалами ( $\geq 25$  м/с), которые прогнозировались в пределах рассматриваемой области в теплый период 2021 г. по выходным данным модели WRF. Продолжительность одного события по модели составляла от 1 ч до 7 ч, поэтому модельные шквалы были представлены в виде треков. Трек – это линейный объект, соединяющий начальную и конечную точку области, в которой прогнозировался шквал (порыв ветра  $\geq 25$  м/с), связанный с одной модельной МКС. Для каждого модельного события было определено время начала и конца, максимальная скорость ветра и время, когда она прогнозировалась, а также построена буферная зона радиусом 50 км вокруг трека (рис. 4.18). Подобный подход использовался, в частности, в работе (Clark et al., 2013).



**Рис. 4.18.** Область, в которой оценивались прогнозы шквалов по модели WRF в теплый период 2021 г., случаи КОЯП по данным наблюдений и треки шквалов по модели WRF

Также для выделения мезоциклонов в выходных данных модели рассчитывался параметр Updraft Helicity – спиральность восходящего потока в слое 2–5 км ( $UH_{2-5km}$ ). Данный параметр широко применяется в качестве индикатора интенсивности вращения в средней тропосфере при прогнозировании суперячеек и смерчей (Clark et al., 2013; Sobash et al., 2016). Критическое значение  $UH_{2-5km}$ , однозначно указывающее на наличие мезоциклона, принято равным  $200 \text{ м}^2/\text{с}^2$ , согласно (Sobash et al., 2016).

Оценка прогнозов основана на объектно-ориентированном подходе (Вельтищев и др., 2011). Была выполнена кросс-валидация случаев шквалов, выявленных по данным наблюдений и по прогностическим данным с применением пороговых критериев по расстоянию (радиус 50 км) и по времени ( $\pm 3$  ч). Для каждого наблюдавшегося шквала была определена максимальная скорость порывов ветра, которая прогнозировалась моделью WRF в радиусе 50 км от места события (для случаев с ветровалами – от центроида ветровала) и в пределах интервала времени  $\pm 3$  ч от момента, когда наблюдалось явление. Если по модели не прогнозировались шквалы в радиусе 50 км от мест их наблюдения и с ошибкой по времени не более 3 ч, или же шквал прогнозировался, но максимальная скорость ветра по модели была менее 20 м/с, то такие события оценивались как пропуски явлений. С целью выявления ложных тревог выполнена такая же оценка для модельных событий. Если в радиусе 50 км и во временном интервале  $\pm 3$  ч относительно модельного события шквалы не были зафиксированы как по данным метеостанций, так и на основе сведений об ущербе или спутниковых снимков ветровалов, то такой случай рассматривался как ложная тревога. Пороговое значение наблюдавшейся скорости ветра при оценке ложных тревог принято равным 20 м/с. Оценка прогноза шквалов на основе перечисленных критериев приведена в табл. 4.12.

Поскольку некоторые локальные шквалы могли быть не зафиксированы метеостанциями и не нанесли никакого значимого ущерба, для каждого модельного шквала были также проанализированы спутниковые снимки Meteosat-8 с целью выявления МКС, которые могли бы вызвать шквал. В результате, в перечне ложных тревог было отдельно определено число случаев, не подтвержденных по данным как наземных, так и спутниковых наблюдений.

Всего модель воспроизвела 30 случаев шквалов с порывами ветра от 25 до 35 м/с, которые относятся к 16 различным датам. Из этих 16 дней только в одном случае (16.07.2021) шквалы на рассматриваемой территории не наблюдались (но отмечался крупный град). С другой стороны в течение 9 дней, когда шквалы фактически наблюдались, они не прогнозировались моделью, что

явно указывает на преобладание пропусков явления над ложными тревогами.

Среди 30 спрогнозированных случаев шквалов только 11 совпадают с данными наблюдений, остальные 19 оценены как ложные тревоги. Среди оправдавшихся прогнозов в 9 случаях были зафиксированы порывы ветра  $\geq 20$  м/с, в 8 случаях поступили сообщения об ущербе от шквалов, в одном случае выявлен крупный ветровал. Рассматривая случаи ложных тревог, можно отметить, что в 11 из них по снимкам Meteosat не было обнаружено МКС, способных вызвать шквал в том месте и в то время, где и когда он прогнозировался. В оставшихся 8 случаях МКС на снимках наблюдались, но судя по данным наблюдений и отсутствию ущерба, сильных шквалов не было (т.е. скорость ветра была завышена моделью). Завышение интенсивности явления имело место и для некоторых оправдавшихся прогнозов. Так, два раза за весь исследуемый период (16.06.2021 и 30.06.2021) по модели прогнозировались швалы ураганной силы (33-35 м/с), но фактически на метеостанциях были отмечены порывы ветра не более 22-23 м/с, а ущерб от шквалов был незначительным.

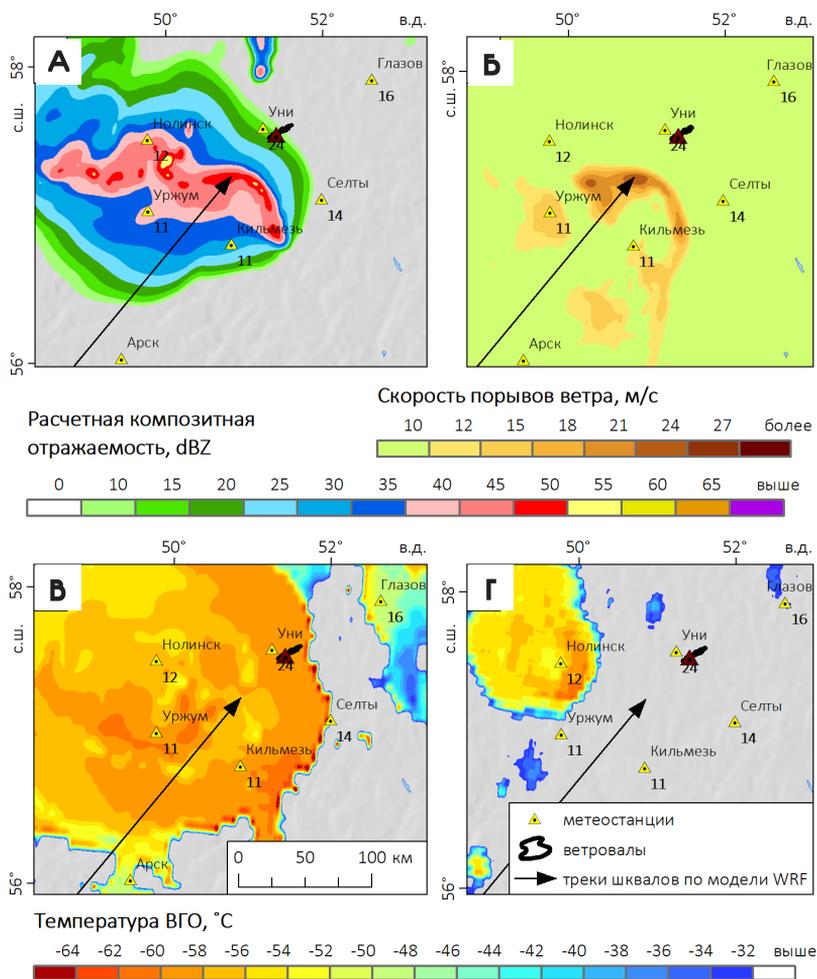
Таблица 4.12

Оценка прогноза шквалов по модели WRF для Пермского края и прилегающих территорий в теплый период 2021 г.

Характеристика	По данным наблюдений		По модели WRF	
	Всего	Совпадающих с данными модели	Всего	Совпадающих с данными наблюдений
Число дней со шквалами/смерчами	23	14	16	15
Число случаев шквалов/смерчей	42	15	30	11

Из 41 случая шквалов, выявленных по всем источникам данных, оправдался прогноз только 14 случаев, а также для единственного случая со смерчем (по модели прогнозировался шквал 25 м/с). Доля оправдавшихся прогнозов составила 36%. В этих случаях модель воспроизводит порывы ветра  $\geq 20$  м/с в радиусе 50 км от места возникновения швала с ошибкой по времени не более  $\pm 3$  ч. Всего в пяти случаях прогнозируемая скорость ветра соответствовала критерию ОЯ ( $\geq 25$  м/с). Однако к числу оправдавшихся относятся прогнозы шквалов, нанесших значительный ущерб (табл. 4.13), в том числе шквал, вызвавший наиболее крупный ветровал 4.08.2021 г. (рис. 4.19). Большинство

шквалов, которые модель успешно воспроизвела, были связаны с МКС масштаба мезо- $\alpha$  (линиями шквалов), что согласуется с результатами, полученными в 2020 г. (Калинин и др., 2021б).



**Рис. 4.19.** Оценка прогноза сильного шквала в Кировской области: расчетная композитная отражаемость (а), скорость порывов ветра (б), температура ВГО по модели WRF (в) и по спутниковому снимку Meteosat-8 (г) в 11.00 ВСВ 4.08.2021 г. Показаны порывы ветра на метеостанциях (м/с)

Таблица 4.13

Случаи шквалов, успешно спрогнозированных по модели WRF в теплый период 2021 г.

Дата	Время (факт), ВСВ	Время (модель), ВСВ	Максимальный порыв ветра, м/с (факт*/модель)	Тип МКС по снимкам Meteosat-8	Ущерб
16.06.2021	18.00	15.00 – 17.00	23/35	Линия шквалов	Нарушено электроснабжение, повалены деревья в г. Красновишерск и пос. Вильгорт
23.06.2021	10.00	10.00 – 12.00	21/25	Линия шквалов	Многочисленные повреждения кровель зданий в нескольких районах Башкортостана
25.06.2021	11.10	09.00 – 10.00	28/26	Кластер масштаба мезо-α	Повреждены кровли управления образования, трех частных жилых домов и производственного здания
30.06.2021	18.00	15.00 – 22.00	23/33	Линия шквалов	Нет данных об ущербе
20.07.2021	12.00	10.00 – 15.00	20/28	Линия шквалов	Снесена кровля многоэтажного дома, повалены деревья
22.07.2021	11.00	10.00 – 15.00	-/25	Линия шквалов	Многочисленные повреждения кровель зданий в нескольких районах Башкортостана
04.08.2021	13.00	08.00 – 11.00	24/23	Суперячейка	Многочисленные повреждения кровель зданий, сплошной ветровал на площади 567 га
04.08.2021	13.00	11.00 – 14.00	-/26	Мультиячейка	Снесены кровли нескольких многоэтажных домов в пос. Чекмагуш

Дата	Время (факт), ВСВ	Время (модель), ВСВ	Максимальный порыв ветра, м/с (факт*/модель)	Тип МКС по снимкам Meteosat-8	Ущерб
20.08.2021	13.00	11.00 – 16.00	28/26	Изолированная ячейка (вероятно суперячейка)**	Снесены кровли 6 частных домов в с. Помоздино, упали опоры ЛЭП
22.08.2021	13.00	11.00 – 13.00	24/25	Мультиячейка	Снесен кирпичный балкон и повреждены кровли 11 домов

*Примечание:*

\*фактическая скорость ветра дана по данным метеостанций, оценки по характеру ущерба не использовались

\*\*Оценка только по спутниковым данным

Прочие 27 случаев отнесены к пропускам явления, причем в 8 из них модель вообще не воспроизвела глубокую конвекцию в радиусе 50 км от места возникновения шквала. В остальных случаях шквалы прогнозировались, но скорость ветра была менее 20 м/с (18 случаев), имела место ошибка по времени свыше 3 ч (1 случая), или отмечались одновременно ошибка по времени и занижение скорости ветра (4 случая). Из шести случаев шквалов, вызвавших ветровалы, был успешно спрогнозирован только один (4.08.2021 г.), в остальных пяти скорость ветра по модели сильно занижена или глубокая конвекция вообще не воспроизводилась моделью.

Таким образом, удалось определить характеристики точности прогноза сильных шквалов по модели WRF на примере выборки случаев, полученной для целого сезона, что является одним из первых подобных исследований для России. Доля успешных прогнозов составила 36%, при этом число пропусков явления превысило число ложных тревог.

Отдельно была выполнена оценка случаев с возникновением смерчей и хорошо выраженных мезоциклонов (суперячейковых облаков) на основе прогноза закритических значений параметра  $UH_{2-5km}$  (свыше 200 м<sup>2</sup>/с<sup>2</sup>). Однако выборка этих событий оказалась слишком мала как по данным наблюдений (один случай смерча и 4 случая суперячеек, зафиксированных по фотографиям очевидцев и подтвержденных по спутниковым снимкам), так и по прогнозу (всего один случай с закритическими значениями  $UH_{2-5km}$  за весь рассматриваемый период). Эти случаи перечислены в табл. 4.14. Единственный случай, когда

по модели прогнозировалось закритическое значение  $UH_{2-5km}$  (до  $218 \text{ м}^2/\text{с}^2$ ) оказался ложной тревогой. Как показано на рис. 4.20, по снимку Meteosat-8 в это время наблюдались лишь умеренно-развитые кучево-дождевые облака с температурой на ВГО до  $-55^\circ\text{C}$  в 100 км севернее траектории прохождения мезоциклона по модели. Тем не менее, на основе полученных данных уже можно сделать вывод о том, что модель WRF в данной конфигурации крайне редко воспроизводит «ложные» мезоциклоны, в отличие от конфигурации, использованной в 2020 г. (Калинин и др., 2021 б).

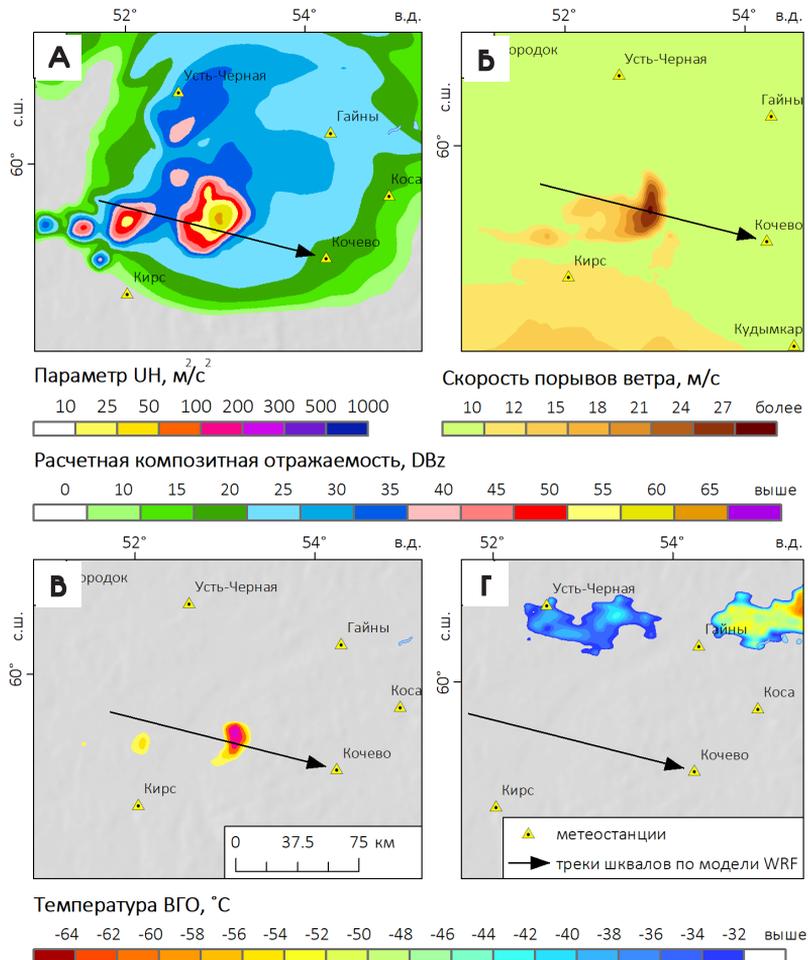
Таблица 4.14

Перечень случаев со смерчами и мезоциклонами по данным наблюдений и моделирования

Дата, время (BCB)	Тип по данным наблюдений	Сопутствующие явления	Максимум $UH$ по модели ( $\text{м}^2 \times \text{с}^{-2}$ )	Максимальный порыв ветра по модели, м/с	Ошибка по положению (км) и по времени (ч)
По данным моделирования					
15.05.2021, 14.00–16.00	Не наблюдались (ложная тревога)	Не наблюдались (ложная тревога)	218	27	-/-
По данным наблюдений					
29.05.2021 11.00	Суперячейка	Град диаметром 30 мм	12	10	-/-
30.05.2021	Суперячейка	Локальный сильный шквал, град (20 мм)	20	10	-/-
30.06.2021 13.00	Смерч	Ливневый дождь, гроза	64	27	75/2
02.08.2021 15.00	Суперячейка	Град диаметром 20 мм	26	12	-/-
04.08.2021, 12.00–13.00	Суперячейка	Шквал 24 м/с, град. Шквал вызвал ветровал на площади 567 га	56	23	0/2

Примечание: ошибка по положению и по времени определена только в тех случаях, когда суперячейка наблюдалась фактически и была воспроизведена моделью

Тот факт, что модель редко воспроизводит закритические значения  $UH_{2-5km}$ , может быть обусловлен ее грубым пространственным разрешением (5 км), принятым в рамках данного эксперимента. Так, в работе (Sobash et al., 2016), авторами которой было предложено пороговое значение  $200 \text{ м}^2/\text{с}^2$ , шаг сетки модели составлял 3 км, а в работе (Taszarek et al., 2019) – 1 км, что вероятно способствовало лучшему воспроизведению мезоциклонов.



**Рис. 4.20.** Пример ложной тревоги при прогнозе мезоциклона по модели WRF: расчетная композитная отражаемость (а), скорость порывов ветра (б), параметр Updraft Helicity по модели WRF (в) и температура ВГО по спутниковому снимку Meteosat-8 (г) в 15.00 ВСУ 15.05.2021 г.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследования ветровалов в лесах умеренного и бореального поясов имеют высокую междисциплинарную значимость. С одной стороны, ветровалы представляют собой существенный фактор нарушения лесного покрова, роль которого в сравнении с другими природными и антропогенными факторами, вызывающими повреждение и/или гибель лесов на территории России, оставалась недостаточно изученной. С другой стороны, систематизация данных о ветровалах позволяет расширить существующие знания о климатологии шквалов и смерчей, получить данные о множестве ранее неизвестных случаях, их пространственно-временном распределении и других характеристиках. Это особенно актуально для регионов с высокой лесистостью и низкой плотностью населения и сети метеостанций. И наконец, частота возникновения ветровалов может рассматриваться как индикатор реакции лесных экосистем на современное потепление климата. Результаты многолетних исследований авторов, представленные в настоящей монографии, позволили расширить существующие знания о ветровалах в лесной зоне России, вызывающих их метеорологических явлениях и условиях возникновения этих явлений. Ниже перечислены наиболее значимые с нашей точки зрения результаты и выводы.

Одним из ключевых результатов, а также информационной основой для всех последующих выводов являются картографические базы данных ветровалов в лесной зоне ЕТР (за период 1986–2020 гг.) и Западной и Центральной Сибири (за период 2001–2020 гг.). В общей сложности эти базы данных включают 1533 ветровала (876 – на ЕТР, 657 – в Сибири), связанных с 1018 разными штормовыми событиями (585 – на ЕТР, 433 – в Сибири). При этом общая площадь ветровалов составляет 4450,7 км<sup>2</sup> (3160,5 км<sup>2</sup> – на ЕТР, 1290,2 км<sup>2</sup> – в Сибири).

Для каждого ветровала определено вызвавшее его метеорологическое явление (с высокой или средней степенью достоверности) и геометрические характеристики, для 777 ветровалов – точная дата возникновения, для 526 ветровалов – время возникновения с точностью в пределах 3 ч. Продолжается работа по актуализации баз данных.

Определена значимость ветровалов как фактора нарушений лесного покрова на ЕТР и в Сибири. Так, на ЕТР ветровалы занимают 0,21% лесопокрытой территории (в том числе 0,17% приходится на ветровалы 2001–2020 гг.), в Сибири этот показатель в 4 раза меньше (0,042%). На ЕТР на ветровалы приходится 2,6% от общей площади нарушений лесного покрова, а в Сибири –

всего 0,4%. Соотношение площади лесов, погибших от пожаров и ветровалов, различается наиболее существенно: на ЕТР площадь гарей превышает площадь ветровалов в 4,2 раза, а в Сибири – более чем в 175 раз. При этом в ряде регионов ЕТР ветровалы являются ведущим природным фактором нарушений лесного покрова.

Соотношение количества и площади ветровалов, вызванных разными метеорологическими явлениями, на ЕТР и в Сибири оказалось достаточно близким. Немногим более 50% случаев приходится на ветровалы, вызванные смерчами, но их вклад в общую площадь составляет всего 13% на ЕТР и 15% в Сибири. На ветровалы, вызванные шквалами, приходится 44% случаев на ЕТР и 42% в Сибири, а доля площади составляет 82% и 70% соответственно. Такое соотношение обусловлено использованием разных порогов минимальной площади для смерчевых (5 га) и прочих (25 га) ветровалов. Ветровалы, вызванные явлениями неконвективной природы, в основном отмечались в горной местности, поэтому их доля в Сибири (свыше 14% общей площади) значительно выше, чем на ЕТР (около 5% общей площади). Последнее принципиально отличает изучаемые ветровалы от аналогичных явлений в большинстве стран зарубежной Европы, где они часто связаны с прохождением зимних штормов.

Крупнейшие ветровалы как на ЕТР, так и в Сибири вызваны долгоживущими конвективными шквалами. На основе многолетних спутниковых данных о ветровалах впервые на территории России подтверждены случаи деречо – сильных долгоживущих шквалов с протяженностью полосы разрушений свыше 400 км и максимальной скоростью ветра  $\geq 33$  м/с. Такие шквалы отмечались как на ЕТР, так и в Сибири, но на ЕТР они вызвали более масштабные ветровалы.

На основе спутниковых данных о ветровалах сформировано новое представление о пространственном распределении случаев смерчей в России, а также о характеристиках полос разрушений, вызванных смерчами (их протяженности и ширине). Выявлено несколько случаев смерчей, которые по длине и ширине трека близки к Ивановскому смерчу 1984 г. Такие смерчи выявлены как в центральной части ЕТР, так и на севере ЕТР и в Сибири. Впервые получена детальная информация о вспышках смерчей. Выявлен ряд случаев вспышек, которые включали более 10 смерчей.

Полученные данные о случаях шквалов и смерчей использованы для диагностики атмосферных процессов, способствующих их возникновению. Применительно к процессам макромасштаба, наиболее интересна и

заслуживает дальнейшего изучения связь случаев сильных шквалов, вызывающих ветровалы, с периферией блокирующих антициклонов. Показано, что условия на западной и северной периферии блокингов в мае-августе способствуют возникновению сильных долгоживущих шквалов (в том числе деречо), вызывающих масштабный ущерб для лесного покрова.

При изучении процессов мезомасштаба выявлен ряд зависимостей между типами явлений, вызывающих ветровалы (шквал или смерч), характеристиками генерирующих их конвективных штормов и значениями конвективных параметров атмосферы. Так, шквалы и смерчи, вызывающие ветровалы, в большинстве случаев генерировались суперячейками или квазилинейными системами (КЛКС), а наиболее крупные вспышки этих явлений были связаны с МКС, которые включали несколько параллельно движущихся мезоциклонов. В 61% случаев при возникновении шквалов и смерчей наблюдались сигнатуры пробоя тропопаузы и кольцевые структуры на верхней границе облаков (ВГО), хорошо различимые по спутниковым снимкам. Эти сигнатуры являются диагностическим признаком, который может использоваться при наукастинге, но более информативен для шквалов, чем для смерчей. Также МКС, генерирующие смерчи, имеют в среднем более высокую температуру ВГО, что связано с меньшими значениями энергии неустойчивости при возникновении смерчей в сравнении со шквалами.

Шквалы и смерчи, которые вызвали ветровалы, в основном формировались при сочетании высокого влагосодержания воздушной массы (медиана 37,1 мм), умеренной или сильной конвективной неустойчивости ( $CAPE > 500$  Дж/кг) и сильного сдвига ветра ( $DLS > 20$  м/с,  $LLS > 10$  м/с). По данным реанализа ERA5 выявлены статистически значимые различия условий возникновения шквалов и смерчей. Для возникновения шквалов наибольшее значение имеет влагосодержание и конвективная неустойчивость, тогда как для смерчей ключевым является низкий уровень конденсации, сильный сдвиг ветра и завихренность. Смерчи формируются в среднем в более холодных воздушных массах, чем сильные шквалы. Значения конвективных параметров влияют и на свойства МКС, генерирующих шквалы и смерчи. Так, долгоживущие МКС формируются обычно при сочетании сильной конвективной неустойчивости и сдвига ветра, тогда как локальные суперячейки, генерирующие смерчи, часто наблюдаются в условиях слабой неустойчивости и сильного сдвига ветра. Появление сигнатур на ВГО зависит в первую очередь от конвективной неустойчивости атмосферы. Дальнейшие исследования в данном направлении могут быть направлены как на решение прикладных задач наукастинга шквалов

и смерчей (для чего необходимы алгоритмы идентификации различных типов конвективных штормов и сигнатур по спутниковым данным), так и на разработку спутниковой климатологии конвективных штормов для всей территории Северной Евразии.

Также в рамках настоящего исследования проводились численные эксперименты с региональной моделью атмосферы WRF по моделированию и прогнозу МКС с сильными шквалами и смерчами. По результатам экспериментов в диагностическом режиме установлено, что в 80% случаев, когда наблюдались шквалы, вызвавшие масштабные ветровалы, модель воспроизводит порывы ветра свыше 25 м/с. Но при этом в большинстве случаев скорость ветра или площадь воздействия шквала занижаются моделью, а также модель не воспроизводит морфологические особенности МКС. По результатам экспериментов с моделью WRF в режиме прогноза (на начальных данных GFS/NCEP) в 2021 г. установлено, что доля успешных прогнозов шквалов с суточной заблаговременностью для восточной части ЕТР составляет всего 36%, причем отмечается преобладание пропусков явлений над ложными тревогами. При этом шквалы, нанесшие значительный ущерб, в большинстве случаев были успешно спрогнозированы. Перспективы повышения точности прогноза могут быть связаны как с дальнейшим подбором оптимальной конфигурации самой модели, так и с возможностью усвоения данных доплеровских радиолокаторов при сверхкраткосрочном прогнозе.

## СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ

### Сокращения на русском языке

АМСГ – Авиационная метеорологическая станция гражданская	ИФА – Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова
БД – База данных	КЛКС – Квазилинейная конвективная система
БПЛА – Беспилотный летательный аппарат	КНЯ – Комплекс неблагоприятных явлений
ВГО – Верхняя граница облаков	К-С (тест) – тест Колмогорова - Смирнова
ВНИИГМИ-МЦД – Всероссийский научно-исследовательский институт гидрометеорологической информации – Мировой центр данных	КОЯП – Конвективное опасное метеорологическое явление
ГИС – Геоинформационная система	МГУ – Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова
ГЛПМ – Государственный лесопатологический мониторинг	МКК – Мезомасштабный конвективный комплекс
ДЗЗ – Дистанционное зондирование Земли	МКС – Мезомасштабная конвективная система
ДМРЛ – Допплеровский метеорологический радиолокатор	МЛТ – Малонарушенные лесные территории
ЕТР – Европейская территория России	МПР – Министерство природных ресурсов
ИК – Инфракрасный (диапазон)	НИВЦ – Научно-исследовательский вычислительный центр

ОЦА – Общая циркуляция атмосферы

ОЯ – Опасное явление (метеорологическое)

ПГНИУ – Пермский государственный национальный исследовательский университет

РАН – Российская академия наук

РНФ – Российский научный фонд

РФФИ – Российский фонд фундаментальных исследований

СМИ – Средства массовой информации

СУБД – Система управления базами данных

УГМС – Управление по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды

ФБУ – Федеральное бюджетное учреждение

ЦГМС – Центр по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды

ЦМР – Цифровая модель рельефа

ЦФО – Центральный федеральный округ

ЧПП – Численный прогноз погоды

### Сокращения на иностранных языках

AHI - Advanced Himawari Imager (название спутникового сенсора)

ALOS – Advanced Land Observing Satellite (название спутника)

AO – Arctic Oscillation (арктическое колебание)

CAPE – Convective Available Potential Energy (Доступная потенциальная энергия неустойчивости)

CFS – Climate Forecast System Re-analysis (название реанализа)

CIN – Convective Inhibition (энергия противодействия конвекции)

CRCUV – Cold-ring and cold U/V (сигнатуры холодного кольца и U/V)

DLS – Deep-Layer Shear (глубокий сдвиг ветра)

EA-WR – Eastern Atlantic – Western Russia (колебание Восточная Атлантика – Западная Россия)

EEFCC – Eastern Europe Forest Cover Change (название продукта, созданного на основе спутниковых данных)

EHI – Energy-Helicity Index (индекс энергии и завихренности)

ERA5 – ECMWF Reanalysis v5 (название реанализа)

ESA – European Space Agency (Европейское Космическое Агентство)

ESRI – Environmental System Research Institute (Институт по исследованию систем окружающей среды)

ESSL – European Severe Storm Laboratory (Европейская лаборатория сильных конвективных штормов)

ESWD – European Severe Weather Database (Европейская база данных опасных явлений погоды)

ETM+ – Enhanced Thematic Mapper+ (название спутникового сенсора)

GFC – Global Forest Change (название продукта, созданного на основе спутниковых данных)

GFS – Global Forecast System (глобальная система прогнозирования погоды)

GLAD – Global Land Analysis and Discovery (лаборатория глобального анализа и исследования земель)

HRV – High-Resolution Visible (видимый канал высокого разрешения)

IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change (Межправительственная группа экспертов по изменению климата)

LCL – Lifted Condensation Level (уровень конденсации)

LFC – Level of Free Convection (уровень свободной конвекции)

LLS – Low-Layer Shear (сдвиг ветра в нижнем слое)

ML – Mixed-Layer (перемешанный слой)

MLS – Mid-Level Shear (сдвиг ветра в среднем слое)

MODIS – Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (название спутникового сенсора)

MSG2 – Meteosat Second Generation (спутники Meteosat 2-го поколения)

MSI – Multi-Spectral Imager (название спутникового сенсора)

MSS – Multi-Spectral Scanner (название спутникового сенсора)

NAO – North-Atlantic Oscillation (североатлантическое колебание)

NASA – National Aeronautics and Space Administration (Национальное управление по воздухоплаванию и исследованию Космоса)

NBR – Normalized Burned Ratio (нормализованное отношение гарей)

NDII – Normalized Difference Infrared Index (нормализованный индекс инфракрасной разности)

NDVI – Normalized Difference Vegetation Index (нормализованный разностный вегетационный индекс)

NIR – Near Infrared (Ближний инфракрасный)

NOAA – National Oceanic and Atmospheric Administration (Национальное агентство по океану и атмосфере)

NSSL – National Severe Storm Laboratory (национальная лаборатория сильных конвективных штормов)

NWS – National Weather Service (Национальная служба погоды США)

OLI – Operational Land Imager (название спутникового сенсора)

OT – Overshooting Top (пробой тропопаузы)

PW – Precipitable Water (общее влагосодержание атмосферы)

SAGA – System for Automated Geoscientific Analysis (Система для автоматизированного исследовательского анализа геоданных)

SAVI – Soil Adjusted Vegetation Index (вегетационный индекс, скорректированный на почву)

SEVIRI – Spinning Enhanced Visible and Infrared Imager (название спутникового сенсора)

SRH – Storm-Relative Helicity (относительная завихренность шторма)

SRTM – Shuttle Radar Topography Mission (программа радарных топографических измерений)

SCP – Supercell Composite parameter (композитный параметр суперячеек)

SHIP – Significant Hail Parameter (параметр значительного града)

STP – Significant Tornado Parameter (параметр значительного торнадо)

SWEAT – Severe Weather Threat (индекс угрозы опасной погоды)

SWIR – Short-wave infrared (коротковолновой инфракрасный)

TM – Thematic Mapper (название спутникового сенсора)

UH – Updraft Helicity (спиральность восходящего потока)

USGS – United State Geological Survey (Геологическая служба США)

WGS – World Geodesic System (Глобальная геодезическая система)

WMO ID – World Meteorological Organization identifier (идентификатор Всемирной метеорологической организации)

WRF – Weather Research and Forecasting (модель численного прогноза погоды)

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. АИС «Опасные гидрометеорологические явления Уральского Прикамья». Электронный ресурс: <http://ais.maps.psu.ru/> (дата обращения 10.01.2022).
2. Аксенов Д.Е. и др. Атлас малонарушенных лесных территорий России. М., МСоЭС. 2003. 187 с.
3. Алексеева А.А. Метод прогноза сильных шквалов // Метеорология и гидрология. 2014. № 9. С. 5–15.
4. Алексеева А.А., Васильев Е.В., Бухаров В.М. Прогноз сильных шквалов на Европейской территории России и их идентификация доплеровскими радиолокаторами // Труды Гидрометеорологического научно-исследовательского центра РФ. 2017. № 363. С. 47–64.
5. 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 конференции). Екатеринбург, 2006. С. 41–47.
6. Анализ условий аномальной погоды на территории России летом 2010 года. Сборник докладов / под. ред. Шакиной Н.П. М., Триада-ЛТД, 2011. 72 с.
7. Ананова Л.Г., Горбатенко В.П., Луковская И.А. Особенности радиолокационных характеристик конвективной облачности при шквалах на юго-востоке Западной Сибири // Метеорология и гидрология. 2007. № 7. С. 51–56.
8. База данных опасных явлений погоды Пермского края. Электронный ресурс: <http://accidentbase.maps.psu.ru/> (дата обращения 10.01.2022).
9. Барашкова Н.К., Кужевская И.В., Поляков Д.В. Экстремальный режим погоды летом 2012 г. на территории Томской области как отражение современных глобальных климатических тенденций // Вестник Томского государственного университета. 2013. № 372. С. 173–179.
10. Бардин М.Ю., Полонский А.Б. Североатлантическое колебание и синоптическая изменчивость в Европейско-Атлантическом регионе в зимний период // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2005. Т. 41. №2. С.147–157.

11. Барталев С.А., Егоров В.А., Крылов А.М., Стыценко Ф.В., Ховратович Т.С. Исследование возможностей оценки состояния поврежденных пожарами лесов по данным многоспектральных спутниковых измерений // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2010. Т.7. № 3. С. 215–225.
12. Барталев С.А. и др. Спутниковое картографирование растительного покрова России по данным спектрорадиометра MODIS // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2011. Т.8. № 4. С. 285–302.
13. Барталев С.А. и др. Спутниковое картографирование растительного покрова России. М., ИКИ РАН. 2016. 208 с.
14. Барталев С.А., Стыценко Ф.В., Егоров В.А., Лупян Е.А. Спутниковая оценка гибели лесов России от пожаров // Лесоведение. 2015. №2. С. 83–94.
15. Бедрицкий А.И., Коршунов А.А., Коршунова Н.Н., Ламанов В.И., Шаймарданов М.З. Опасные гидрометеорологические явления, вызываемые ветром, и их влияние на экономику России // Метеорология и гидрология. 2001. № 9. С. 5–17.
16. Брюхань Ф.Ф., Ляхов М.Е., Погребняк В.Н. Смерчопасные зоны в СССР и размещение атомных станций // Известия АН СССР. Сер. географическая. 1989. № 1. С. 40–48.
17. Булыгина О.Н., Веселов В.М., Разуваев В.Н., Александрова Т.М. «Описание массива срочных данных об основных метеорологических параметрах на станциях России». Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2014620549.
18. Быков А.В., Шихов А.Н. Опасные погодные явления Пермского края. Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2015621594 от 22.10.2015.
19. Быков А.В., Шихов А.Н. Прогноз мезомасштабных конвективных систем с применением глобальных и мезомасштабных гидродинамических моделей // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2018. Т. 15. № 2. С. 213–224.

20. Васильев Е.В., Алексеева А.А. Песков Б.Е. Условия возникновения и краткосрочный прогноз сильных шквалов // Метеорология и гидрология. 2009. № 1. С. 5–16.
21. Васильев Е.В., Лукьянов В.И., Найшуллер М.Г. Аномальные гидрометеорологические явления на территории Российской Федерации в июне 2007 г. // Метеорология и гидрология. 2007. № 9. С. 108–122.
22. Вельтищев Н.Ф., Жупанов В.Д. Численные прогнозы погоды по негидростатическим моделям общего пользования WRF-ARW и WRF-NMM. / В сб.: 80 лет Гидрометцентру России. М., 2010. С. 94–135.
23. Вельтищев Н.Ф., Жупанов В.Д., Павлюков Ю.Б. Краткосрочный прогноз сильных осадков и ветра с помощью разрешающих конвекцию моделей WRF // Метеорология и гидрология. 2011. № 1. С. 5–18.
24. Вельтищев Н.Ф., Жупанов В.Д. Эксперименты по усвоению радиолокационной отражаемости в модели WRF-ARW // Метеорология и гидрология. 2012. № 3. С. 5–19.
25. Вильфанд Р.М., Ривин Г.С., Розинкина И.А. Система COSMO-Ru негидростатического мезомасштабного краткосрочного прогноза погоды Гидрометцентра России: первый этап реализации и развития // Метеорология и гидрология. 2010. № 8. С. 5–20.
26. Вознячук Л.П. Материалы к изучению смерчей на территории Белоруссии. – Минск. БГУ, Ученые записки Белорусского гос. университета. Серия геолого-географ. 1954. Вып. 21. С. 87–103.
27. Волкова Е.В., Успенский А.Б. Оценки параметров облачного покрова в светлое время суток по данным геостационарного метеоспутника МЕТЕОСАТ-8 // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2008. Т. 5. № 1. С. 441–450.
28. Волкова Е.В., Успенский А.Б., Кухарский А.В. Специализированный программный комплекс получения и валидации спутниковых оценок параметров облачности и осадков // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2015. Т. 12. № 3. С. 7–26.

29. Восточноевропейские леса: история в голоцене и современность / Под ред. О.В. Смирновой. М., Наука, 2004. Т.2. 575 с.
30. 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.
31. Горбатенко В.П., Ипполитов И.И., Поднебесных Н.В. Циркуляция атмосферы над Западной Сибирью в 1976-2004 гг. // Метеорология и гидрология. 2007. № 5, с. 28-36
32. Гочаков А.В., Блинов Д.В., Захарченко Д.И., Антохина О.Ю., Шихов А.Н. Исследование возможностей прогноза опасных конвективных явлений на территории Западной Сибири с помощью моделей консорциума COSMO // Труды СибНИГМИ. 2021. Вып. 2017. С. 6–19.
33. 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.
34. Денисова А.Ю. и др. 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.
35. Департамент лесного хозяйства Костромской области. Объявлена неделя восстановления лесных площадей, пострадавших от природной стихии. Электронный ресурс: <https://dlh44.ru/news/0083b67e-b88f-4248-9eeb-042c554e9566/f8f4417d-45a9-4ad4-9cd9-38a94ab71681.aspx#:~:text=Летом%202010%20года%20в%20результате,-750%20га.%20Островский%20-2576%20га> (дата публикации 03.10.2011, дата обращения 10.01.2022).
36. Динамика явлений и процессов в природном комплексе заповедника. Летопись природы Центрально-Лесного заповедника. Кн. 57 (2017) / ФГБУ «Центрально-Лесной государственный заповедник», 2018. 400 с.

37. Дмитриева Т.Г., Песков Б.Е. Численный прогноз с мезосиноптическим уточнением двух случаев особо сильных шквалов на Европейской части России летом 2010 г. // Метеорология и гидрология. 2013. № 2. С. 18–30.
38. Дмитриева Т.Г., Песков Б.Е. Синоптические условия, наукастинг и модельные прогнозы сильных шквалов и смерчей в Башкирии 1 июня 2007 г. и 29 августа 2014 г. // Метеорология и гидрология. 2016. № 10, с. 16–29.
39. Доклад Губернатора области «Об экологической ситуации на территории Новгородской области в 2011 году». Электронный ресурс: <https://www.povreg.ru/vlast/governor/doclad-ecolog-2011.php> (дата обращения 10.01.2022).
40. Доклад о состоянии и охране окружающей среды Вологодской области в 2011 году / Правительство Вологодской области, Департамент природных ресурсов и охраны окружающей среды Вологодской области. Вологда, 2012. 248 с.
41. Доклад о состоянии и об охране окружающей среды Смоленской области в 2016 году / Администрация Смоленской области. Смоленск, 2017. 289 с.
42. Доклад о состоянии и об охране окружающей среды Смоленской области в 2013 году / Администрация Смоленской области. Смоленск, 2014. 278 с.
43. Доклад о состоянии и охране окружающей среды Ярославской области в 2009-2010 годах. Ярославль. Департамент охраны окружающей среды и природопользования Ярославской области. 2011. 256 с.
44. Дядюченко В., Павлюков Ю., Вылегжанин И. Допплеровские радиолокаторы в России // Наука в России. 2014. № 1. С. 23–27.
45. Елсаков В.В., Марущак И.О. Роль спутникового мониторинга в выявлении изменений растительного покрова предгорной и горной части Урала // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2010. Т. 7. № 1. С. 310–318.

46. Калинин Н.А. Динамическая метеорология. Пермь, изд-во Пермского университета, 2001. 256 с.
47. Калинин Н.А., Быков А.В., Пищальникова Е.В., Шихов А.Н. Анализ условий возникновения сильных шквалов в Пермском крае по данным наблюдений и результатам численного моделирования // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2018. № 2 (368). С. 7–27.
48. Калинин Н.А., Смирнова А.А. Определение водности и водозапаса кучево-дождевой облачности по информации метеорологического радиолокатора // Метеорология и гидрология. 2011. № 2. С. 30–43.
49. Калинин Н.А., Шихов А.Н., Быков А.В. Прогноз мезомасштабных конвективных систем на Урале с помощью модели WRF и данных дистанционного зондирования // Метеорология и гидрология. 2017. №1. С. 16–28.
50. Калинин Н.А., Шихов А.Н., Быков А.В., Ажигов И.О. Условия возникновения и краткосрочный прогноз сильных шквалов и смерчей на Европейской территории России. // Оптика атмосферы и океана. 2019. Т. 32. № 1. С. 62–69.
51. Калинин Н. А. и др. Условия формирования и краткосрочный прогноз конвективных опасных явлений погоды в Уральском регионе в теплый период 2020 года // Оптика атмосферы и океана. 2021. Т. 34. № 01. С. 46–56.
52. Калинин Н.А., Шихов А.Н., Чернокульский А.В., Костарев С.В., Быков А.В. Условия возникновения сильных шквалов и смерчей, вызывающих крупные ветровалы в лесной зоне Европейской части России и Урала // Метеорология и гидрология. 2021. №2. С. 35–49.
53. Кац А.Л. Сезонные изменения общей циркуляции атмосферы и долгосрочные прогнозы. Л., Гидрометеиздат, 1960. 270 с.
54. Климат России / Под ред. Н.В. Кобышевой. СПб., Гидрометеиздат, 2001. 655 с.
55. Константинова Д.А., Горбатенко В.П. Условия образования шквала над юго-восточной территорией Западной Сибири // Вестник Томского государственного университета. 2010. № 337. С. 189–193.

56. Королева Н.В., Ершов Д.В. Оценка погрешности определения площадей ветровалов по космическим изображениям высокого пространственного разрешения LANDSAT-TM // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2012. Т. 9. № 1. С. 80–86.
57. Критерии опасных гидрометеорологических явлений для территории деятельности Уральского УГМС. Электронный ресурс: [http://svgimet.ru/?page\\_id=812](http://svgimet.ru/?page_id=812) (дата обращения 10.01.2022).
58. Крылов А.М., Владимирова Н.А. Дистанционный мониторинг состояния лесов по данным космической съемки // Геоматика. 2011. № 3. С. 53–58.
59. Крылов А.М., Малахова Е.Г., Владимирова Н.А. Выявление и оценка площадей катастрофических ветровалов 2009–2010 гг. по данным космической съемки // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2012. № 200. С. 197–207.
60. Крылов А.М., Соболев А.А., Владимирова Н.А. Выявление очагов короёда-типографа в Московской области с использованием снимков Landsat // Вестник Московского государственного университета леса – Лесной вестник. 2001. №4. С. 54-60
61. Курганский М.В., Чернокульский А.В., Мохов И.И. Смерч под Ханты-Мансийском: пока исключение или уже симптом? // Метеорология и гидрология. 2013. № 8. С. 40–50.
62. Лупян Е.А. и др. Спутниковый мониторинг лесных пожаров в 21 веке на территории Российской Федерации (цифры и факты по данным детектирования активного горения) // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2017. Т. 14. № 6. С. 158–175.
63. Метеорологический ежемесячник // Уральское УГМС. 1981–2012. Вып. 1–12.
64. Научно-технический журнал «Метеорология и гидрология». Электронный ресурс: <http://mig-journal.ru/archive> (дата обращения 10.01.2022).
65. Новицкий М.А. и др. Башкирский смерч: возможности анализа и прогноза смерчопасной ситуации // Метеорология и гидрология. 2016. № 10. С. 30–40.

66. Новицкий М.А., Шмерлин Б.Я., Петриченко С.А., Терех Л.А., Калмыкова О.В. О совместном расчете полей вертикальной скорости и конвективных индексов в модели WRF для анализа и прогноза смерчеопасных ситуаций // Метеорология и гидрология. 2018. № 9. С. 14–26.
67. Окский государственный заповедник. Ветровал 14 июля. Электронный ресурс: [http://oksky-reserve.ru/press/news/2020/07/22/news\\_715.html](http://oksky-reserve.ru/press/news/2020/07/22/news_715.html) (дата обращения 10.01.2022).
68. Опасные явления погоды на территории Сибири и Урала. Справочник специалиста. Л., Гидрометеиздат. 1987. Ч.3. 200 с.
69. Опасные явления погоды Центрального Федерального округа. Электронный ресурс: <http://convective-storms.psu.ru/> (дата обращения 10.01.2022).
70. Панфутова Ю.А. Опасные метеорологические явления на равнинной территории России и риски, создаваемые ими: автореф. дис. канд. геогр. наук. СПб. 2008. 21 с.
71. Переведенцев Ю.П., Мохов И.И., Елисеев А.В., Шанталинский К.М., Важнова Н.А. Теория общей циркуляции атмосферы: уч. пос. Казань, Казан. ун-т, 2013. 224 с.
72. Переходцева Э.В. Прогнозирование смерчей и сильных шквалов в центральном районе России летом 2009 года на основе статистических моделей // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2010. Т. 7. № 3. С. 33–40.
73. Переходцева Э.В. Модель гидродинамико-статистического прогноза с заблаговременностью 12–48 ч сильных шквалов и смерчей по территории Сибири // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2011. Т. 8. № 1. С. 263–270.
74. Пермский центр по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды. Электронный ресурс: <http://meteo.perm.ru/> (дата обращения 10.01.2022).
75. Петухов И.Н. Роль массовых ветровалов в формировании лесного покрова в подзоне южной тайги (Костромская область): дисс. канд. биол. наук. Кострома, 2016. 150 с.

76. Петухов И.Н., Немчинова А.В. Ветровальные нарушения лесного покрова в Костромской области и на сопредельных территориях в 1984–2011 гг. // Лесоведение. 2014. № 6. С. 17–25.
77. Погода и климат. Электронный ресурс: <http://pogodaiklimat.ru/> (дата обращения 10.01.2022).
78. Приказ Министерства природных ресурсов и экологии РФ от 05.04.2017 № 156 «Об утверждении Порядка осуществления государственного лесопатологического мониторинга». Зарегистрировано в Минюсте РФ 30.06.2017, № 47257
79. Приказ Министерства природных ресурсов и экологии РФ от 09.11.2020 № 910 «Об утверждении порядка проведения лесопатологических обследований и формы Акта лесопатологического обследования». Зарегистрировано в Минюсте РФ 18.12.2020, № 61584.
80. Пузаченко М.Ю. Ландшафтная приуроченность ветровалов в Центрально-Лесном заповеднике // Труды Центрально-Лесного заповедника. Тула: Гриф и К., 2007. С. 304–324.
81. Пьянков С.В., Шихов А.Н., Абдуллин Р.К. Атлас опасных гидрометеорологических явлений Уральского Прикамья. Перм. гос. нац. иссл. ун–т. Пермь. 2016. 116 с.
82. Реймерс Н.Ф., Яблоков А.В. Словарь терминов и понятий, связанный с охраной живой природы. М., Изд-во Наука, 1982. 144 с.
83. Ривин Г.С. и др. Система численного прогнозирования явлений погоды, включая опасные, для Московского мегаполиса: разработка прототипа // Метеорология и гидрология. 2019. № 11. С. 33–45.
84. Рожков А.А., Козак В.Г. Устойчивость лесов. М., Агропромиздат. 1989. С. 239.
85. Романский С.О., Вербицкая Е.М., Суляндзига П.Б. Результаты численного моделирования формирования и развития интенсивной конвекции, вызвавшей смерч в Благовещенске 31 июля 2011 г. // Метеорология и гидрология. 2020. № 6. С. 25–36.
86. Российский центр защиты леса. Электронный ресурс: <https://rcfh.ru/branches/> (дата обращения 10.01.2022).

87. Рубинштейн К.Г., Губенко И.М., Игнатов Р.Ю., Тихоненко Н.Д., Юсупов Ю.И. Эксперименты по усвоению данных сети грозопеленгации // Оптика атмосферы и океана. 2019. Т. 32. № 11. С. 936–941.
88. Скворцова Е.Б., Уланова Н.Г., Басевич В.Ф. Экологическая роль ветровалов. М., 1983. 122 с.
89. Смерчи в лесной зоне России. Электронный ресурс: <http://tornado.psu.ru/> (дата обращения 10.01.2022).
90. Снитковский А.И. Смерчи над территорией СССР // Метеорология и гидрология. 1987. №9. С. 12–25.
91. Сукцессионные процессы в заповедниках России и проблемы сохранения биологического разнообразия / Под ред. О.В. Смирновой, Е.С. Шапошникова. СПб., Российское ботаническое общество, 1999. С. 549.
92. Схема размещения, использования и охраны охотничьих угодий на территории Ульяновской области. Утверждена Указом Губернатора Ульяновской области от 02.04.2020 № 40. Электронный ресурс: <https://ulgov.ru/docs/20200402-ukaz40.pdf> (дата обращения 10.01.2022).
93. Тобольску ураган нанес многомиллионный ущерб. Электронный ресурс: <https://72.ru/text/gorod/2010/06/17/60725181/> (дата публикации 17.06.2010, дата обращения 10.01.2022).
94. Уваров И.А., Ершов Д.В., Крылов А.М., Барталев С.А., Лупян Е.А. Информационная система космического мониторинга санитарного состояния лесов ВЕГА-лесопатолог // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2012. Т. 9. № 5. С. 171–180.
95. Уланова Н.Г. Восстановительная динамика растительности сплошных вырубок и массовых ветровалов в ельниках южной тайги. Дисс. д-ра биол. наук: 03.00.05. М., РГБ. 2006. 434 с.
96. Ураган унес жизни шести человек. Электронный ресурс: <http://baik-info.ru/sm/2004/29/002003.html> (дата публикации 22.07.2004, дата обращения 10.01.2022).

97. Ущерб от урагана в Вуктыльском районе оценивается в более чем 10 млн. рублей. Электронный ресурс: <https://komiinform.ru/news/69081/> (дата публикации 16.08.2010, дата обращения 10.01.2022).
98. Хромов С.П., Мамонтова Л.И. Метеорологический словарь. Л., Гидрометеиздат, 1974. 568 с.
99. Центр защиты леса Калужской области. Электронный ресурс: [https://kaluga.rcfh.ru/presscenter/novosti/vremya-podvesti-itogi-no-ne-vremya-ostanavlivatsya/?sphrase\\_id=485](https://kaluga.rcfh.ru/presscenter/novosti/vremya-podvesti-itogi-no-ne-vremya-ostanavlivatsya/?sphrase_id=485) (дата публикации 01.12.2021, обращения 10.01.2022).
100. Центр защиты леса Новгородской области. Электронный ресурс: <https://лесозащита.рф/blog/material/povrezhdennyye-lesa-novgorodskoj-oblasti-obsledovali-pri-pomoshhi-kvadrokoptera> (дата обращения 10.01.2022)
101. Центр защиты леса Республики Марий Эл. Электронный ресурс: [https://vk.com/czl12?w=wall-80027631\\_136%2Fall](https://vk.com/czl12?w=wall-80027631_136%2Fall) (дата публикации 03.10.2017, дата обращения 10.01.2022).
102. Чабак Е. Леса Ленобласти: жизнь после ветровала // Леспроминформ. 2011. № 3. С. 44–46.
103. Чернокульский А.В. и др. Смерчи в российских регионах // Метеорология и гидрология, 2021. №2. С. 17–34.
104. Чернокульский А.В. и др. Опасные атмосферные явления конвективного характера в России: наблюдаемые изменения по различным данным // Метеорология и гидрология. 2022а. № 5. С. 27–42.
105. Чернокульский А.В. и др. Шквалы и смерчи на европейской части России 15 мая 2021 г.: диагностика и моделирование // Метеорология и гидрология. 2022б. № 11. С. 71 – 91.
106. Шакина Н.П., Иванова А.Р., Бирман Р.А., Скриптунова Е.Н. Блокирование: условия лета 2010 в контексте современных знаний. Анализ условий аномальной погоды на территории России летом 2010 года. М., ТРИАДА-ЛТД, 2011. С. 6–21.

107. Шамин С.И., Бухонова Л.К., Санина А.Т. «Сведения об опасных и неблагоприятных гидрометеорологических явлениях, которые нанесли материальный и социальный ущерб на территории России». Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2019621326.
108. Шихов А.Н. Шквал в Архангельской области 8 июля 2020 г. Электронный ресурс <http://meteoweb.ru/2020/news/wn2020072200.php> (дата публикации 22.07.2020, дата обращения 10.01.2022).
109. Шихов А.Н., Абдуллин Р.К., Чернокульский А.В., Ажигов И.О., Ярынич Ю.И., Спрыгин А.А., Коренев Д.П. Конвективные опасные метеорологические явления на территории Центрального Федерального округа // Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2021623259 от 28.12.2021.
110. Шихов А.Н., Ажигов И.О. Шквалы и смерчи в Кировской области 27 июня 2020 года. Электронный ресурс: <http://meteoweb.ru/2020/news/wn2020071400.php> (дата публикации 13.07.2020, дата обращения 10.01.2022).
111. Шихов А.Н. и др. Создание картографической базы данных и веб-сервиса «Конвективные опасные метеорологические явления на территории Центрального федерального округа» // ИнтерКарто. ИнтерГИС. Геоинформационное обеспечение устойчивого развития территорий: Материалы Междунар. конф. М., Геогр. ф-т МГУ, 2021. Т. 27. Ч. 3. С. 120–135.
112. Шихов А.Н., Быков А.В. База данных об опасных и неблагоприятных явлениях погоды в Пермском крае как региональный аналог ESWD // Географический вестник. 2014. №4. С. 102–109.
113. Шихов А.Н., Быков А.В. Изучение двух случаев сильных смерчей в Предуралье // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из Космоса. 2015. Т. 12. № 3. С. 124–133.
114. Шихов А.Н., Зарипов А.С. Многолетняя динамика потерь лесов от пожаров и ветровалов на северо-востоке Европейской России по спутниковым данным // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2018. Т. 15. № 7. С. 114–128.

115. Шихов А.Н., Калинин Н.А., Быков А.В., Ажигов И.О., Шумихина А.В. Смерчи в условиях слабой конвективной неустойчивости атмосферы: анализ двух случаев на востоке европейской территории России // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2020. Т. 17. №5. С. 255–268.
116. Шихов А.Н., Чернокульский А.В., Спрыгин А.А., Ажигов И.О. Идентификация мезомасштабных конвективных облачных систем со смерчами по спутниковым данным // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16. № 1. С. 223–236.
117. Шихов А.Н., Чернокульский А.В., Ажигов И.О. Пространственно-временное распределение ветровалов в лесной зоне Западной Сибири в 2001–2020 гг. // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2022. Т. 19. № 3. С. 186–202
118. Adler R.F., Markus M.J., Fenn D.D. Detection of severe midwest thunderstorms using geosynchronous satellite data // Amer. Meteorol. Soc. 1985. V. 113. P. 769–781.
119. Albrecht A.T., Fortin M., Kohnle U., Ningre F. Coupling a tree growth model with storm damage modeling – Conceptual approach and results of scenario simulations // Environ. Model. Software. 2015. V. 69. P. 63–76.
120. Albrecht A.T., Jung C., Schindler D. Improving empirical storm damage models by coupling with high-resolution gust speed data // Agricult. Forest Meteorol. 2019. V. 268. P. 23–31.
121. Allen T.R., Kupfer J.A. Spectral response and spatial pattern of Fraser fir mortality and regeneration, Great Smoky Mountains, USA // Plant Ecology, 2001. V. 156, P. 59–74.
122. ALOS Global Digital Surface Model “ALOS World 3D – 30m (AW3D30)”. Электронный ресурс: <https://www.eorc.jaxa.jp/ALOS/en/aw3d30/index.htm> (дата обращения 10.01.2022).
123. AMS glossary of meteorology. Precipitable water. Электронный ресурс: [http://glossary.ametsoc.org/wiki/Precipitable\\_water](http://glossary.ametsoc.org/wiki/Precipitable_water) (дата обращения 10.01.2022).

124. Anderegg, W.R.L. et al. Climate-driven risks to the climate mitigation potential of forests // *Science*. 2020. V. 368(6497). DOI: 10.1126/science.aaz7005.
125. Anyomi K.A. Mitchell S.J. Perera A.H. Ruel, J.-C. Windthrow Dynamics in Boreal Ontario: A Simulation of the Vulnerability of Several Stand Types across a Range of Wind Speeds // *Forests*. 2017. V. 8. Art. No. 233.
126. Arakawa A., Schubert W.H. Interaction of a cumulus cloud ensemble with the large-scale environment, Part I // *J. Atmos. Sci.*, 1974. V. 31. P. 674–701.
127. Arakawa A., Wu C.M. A unified representation of deep moist convection in numerical modeling of the atmosphere. Part I // *J. Atmos. Sci.* 2013. V. 70. P. 1977–1992.
128. Ashley W.S., Mote T.L. Derecho hazards in the United States // *Bull. Amer. Meteor. Soc.* 2005. V. 86(11). P. 1577–1592.
129. Ball G.H., Hall D.J. ISODATA, a Novel Method of Data Analysis and Pattern Classification. Stanford Research Institute, Menlo Park. 1965.
130. Battles J.J., Cleavit N.L., Saah D.S. Poling, B.T. Fahey, T.J. Ecological impact of a microburst windstorm in a northern hardwood forest // *Canadian J. of Forest Res.* 2017. V. 47(12), P. 1695–1701.
131. Baumann M. et al. Landsat remote sensing of forest windfall disturbance // *Rem. Sens. Environ.* 2014. V.143. P. 171–179.
132. Bech J. et al. Tornado damage analysis of a forest area using site survey observations, radar data and a simple analytical vortex model // *Atmos. Res.* 2009. V. 93(1–3). P. 118–130.
133. Beck V., Dotzek N. Reconstruction of near-surface tornado wind fields from forest damage // *J. Appl. Meteorol. Climatol.* 2010. V. 49. P. 1517–1537.
134. Bedka K.M. Overshooting cloud top detections using MSG SEVIRI infrared brightness temperatures and their relationship to severe weather over Europe // *Atmos. Res.* 2011. V. 99(2). P. 175–189.
135. Bedka K. et al. Objective satellite-based detection of overshooting tops using infrared window channel brightness temperature gradients // *J. Appl. Meteorol. Climatol.* 2010. V. 49(2). P. 181–202.

136. Bedka K., Murillo E.M., Homeyer C.R.6 Scarino B., Mersiovsky, H. The above-anvil cirrus plume: An important severe weather indicator in visible and infrared satellite imagery // *Wea. Forecasting*. 2018. V. 33. P. 1159–1181.
137. Boehner J., Antonic O. Land-surface parameters specific to topo-climatology. in: Hengl T., Reuter H. (Eds.): *Geomorphometry – Concepts, Software and Applications // Developments in Soil Science*. 2009. V. 33, P. 195–226.
138. Bouchard M., Pothier D., Ruel J.-C. Stand-replacing windthrow in the boreal forests of eastern Quebec // *Canadian J. of Forest Res.* 2009. V. 39(2), P. 481–487.
139. Brooks H.E. On the relationship of tornado path length and width to intensity // *Wea. Forecasting*. 2004. V. 19. P. 310–319.
140. Brooks H.E. Proximity soundings for severe convection for Europe and the United States from reanalysis data // *Atmos. Res.* 2009. V. 93. P. 546–553.
141. Brooks H.E. et al. A century of progress in severe convective storm research and forecasting. in: *A Century of Progress in Atmospheric and Related Sciences: Celebrating the American Meteorological Society Centennial*. Chapter 18. P.18.1–18.41. AMS, Meteorol. Monographs. 2018.
142. Brunner J.C., Ackerman S.A., Bachmeier A.S., Rabin R.M. A quantitative analysis of the enhanced-V feature in relation to severe weather // *Weather Forecast*. 2007. V. 22. P. 853–872.
143. Bukharov M.V., Kukharskii A.V., Misnik L.A. Automated work place “Planeta-Meteoobzor” for monitoring hazardous weather associated with convective clouds // *Russ. Meteorol. Hydrol.* 2008. V. 33(2). P. 102–105.
144. Cannon J.B., Hepinstall-Cymerman J., Godfrey C.M, Peterson C.J. Landscape-scale characteristics of forest tornado damage in mountainous terrain // *Landscape Ecol.* 2016. V. 31(9). P. 2097–2114.
145. Chehata N., Orny C., Boukir S., Guyon D., Wigner J.P. Object-based change detection in wind storm-damaged forest using high-resolution multispectral images // *Int. J. Rem. Sens.* 2014. V. 35(13). P. 4758–4777.
146. Chernokulsky A.V., Kurgansky M.V., Zakharchenko D.I., Mokhov I.I. Genesis Environments and Characteristics of the Severe Tornado in the South Urals on August 29, 2014 // *Russ. Meteorol. Hydrol.* 2015. V. 40. P. 794–799.

147. Chernokulsky A.V., Shikhov A.N. 1984 Ivanovo tornado outbreak: Determination of actual tornado tracks with satellite data // *Atm. Res.* 2018. V. 207. P. 111–121.
148. Chernokulsky A. et al. Observed changes in convective and stratiform precipitation in Northern Eurasia over the last five decades // *Env. Res. Letters.* 2019. V. 14, Art. No. 045001–17.
149. Chernokulsky A. et al. Tornadoes in Northern Eurasia: from the Middle Age to the Information Era // *Mon. Wea. Rev.*, 2020a, Vol. 148, P. 3081–3111.
150. Chernokulsky A.V., Shikhov A.N., Bykov A.V., Azhigov I.O. Satellite-Based Study and Numerical Forecasting of Two Tornado Outbreaks in the Ural Region in June 2017 // *Atmosphere.* 2020b. V. 11. Art. No. 1146.
151. Chernokulsky A. et al. Diagnosis and modelling of two destructive derecho events in European Russia in the summer of 2010 // *Atmos. Res.* 2022. V. 267. Art. No. 105928.
152. Chernokulsky A., Shikhov A., Yarinich Yu., Sprygin A. An Empirical Relationship among Characteristics of Severe Convective Storms, Their Cloud-Top Properties and Environmental Parameters in Northern Eurasia // *Atmosphere.* 2023. V. 14(1). Art. No. 174.
153. Chirici G. et al. Monitoring clearcutting, subsequent rapid recovery in Mediterranean coppice forests with Landsat time series // *Ann. Forest Sci.* 2020. V. 77. Art No. 40.
154. Cintineo J.L. et al. A deep-learning model for automated detection of intense midlatitude convection using geostationary satellite images // *Wea. Forecasting.* 2020. V. 35(6). P. 2567–2588.
155. Clark A.J. et al. Tornado pathlength forecasts from 2010 to 2011 using ensemble updraft helicity // *Wea. Forecasting.* 2013, V. 28(2). P. 387–407.
156. Cocke A.E., Fulé P.Z., Crouse J.E. Comparison of burn severity assessments using Differenced Normalized Burn Ratio and ground data // *Int. J. Wildland Fire.* 2005. V. 14(2). P. 189–198.
157. Coppin P.R., Bauer M.E. Processing of multi-temporal Landsat TM imagery to optimize extraction of forest cover change features // *IEEE Transactions on Geosci. Rem. Sens.* 1994. V. 32. P. 918–927.

158. Crist E.P., Laurin R., Cicone R.C. Vegetation and soils information contained in transformed Thematic Mapper data // Proc. of Int. Geosci. Rem. Sens. Symposium (IGARSS) – 1986. ESA Publications Division, ESA SP254, European Space Agency, Paris, 1465–1470.
159. Curtis P.G., Slay C.M., Harris N.L., Tyukavina A., Hansen M.C. Classifying drivers of global forest loss // Science. 2018. V. 361(6407). P. 1108–1111.
160. Das M.K., Das S., Chowdhury M.A.M., Karmakar S. Simulation of tornado over Brahmanbaria on 22 March 2013 using Doppler weather radar and WRF model // Geomatics, Nat. Hazards and Risk 2016. V. 7(5). P. 1577–1599.
161. Diffenbaugh N.S., Scherer M., Trapp R.J. Robust increases in severe thunderstorm environments in response to greenhouse forcing // Proc. Nat. Academy of Sciences of the U.S. 2013. V. 110(41). P. 16361–16366.
162. Dobbertin M. Influence of stand structure, site factors on wind damage comparing the storms Vivian and Lothar // Forest, Snow and Landscape Res. 2002. V. 77(1-2). P. 187–205.
163. Doswell C.A., Burgess D.W. On some issues of United States tornado climatology // Mon. Wea. Rev. 1988. V. 116. P. 495–501.
164. Doswell C.A. III, Brooks H.E., Maddox R.A. Flash flood forecasting: An ingredients-based methodology // Wea. Forecasting, 1996. V. 11. P. 560–581.
165. Dyer R.C. Remote sensing identification of tornado tracks in Argentina, Brazil and Paraguay // Photogram. Eng. Rem. Sens. 1988. V. 54. P. 429–1435.
166. Eastern Europe Forest Cover Dynamics 1985 to 2012. Электронный ресурс: <https://glad.umd.edu/dataset/eastern-europe-forest-cover-dynamics-1985-2012> (дата обращения 10.01.2022).
167. Einzmann K. et al. Windthrow detection in European forests with very high-resolution optical data // Forests. 2017. V. 8(1), Art. No. 21.
168. EOS LandViewer. Электронный ресурс: <https://eos.com/landviewer/> (дата обращения 10.01.2022).

169. Eumetsat Earth Observation Portal. Электронный ресурс: <https://eoportal.eumetsat.int/> (дата обращения 10.01.2022).
170. European Severe Weather Database. Электронный ресурс: <https://eswd.eu/> (дата обращения 10.01.2022).
171. Everham E.M., Brokaw N.V.L. Forest damage and recovery from catastrophic wind // *Botanical Review*. 1996. V. 62. P. 113–185.
172. Feser F. et al. Storminess over the North Atlantic and northwestern Europe – A review // *Quarterly J. of the Royal Meteorol. Soc.* V. 141(687), P. 350–382.
173. Fierro A.O., Mansell E.R., Ziegler C.L.; MacGorman D.R., Application of a lightning data assimilation technique in the WRF-ARW model at cloud-resolving scales for the tornado outbreak of 24 May 2011 // *Mon. Weather Rev.* 2012. V. 140(8). P. 2609–2627.
174. Finch J., Bikos D. Russian tornado outbreak of 9 June 1984 // *Electronic J. Severe Storms Meteorol.* 2012. V. 7. P. 1–28.
175. Frelich L.E., Lorimer C.G. Natural disturbance regimes in hemlock-hardwood forests of the Upper Great Lakes region // *Ecol. Monogr.* 1991. V. 61. P. 145–164.
176. Forzieri G. et al. A spatially explicit database of wind disturbances in European forests over the period 2000–2018 // *Earth Syst. Sci. Data.* 2020. V.12. P. 257–276.
177. Forzieri G. et al. Emergent vulnerability to climate-driven disturbances in European forests // *Nat. Communications.* 2021. V. 12, Art. No. 1081.
178. Fraser R.H. An analysis of large-scale forest cover disturbance in Canada (1998–2004) based on multi-temporal coarse resolution data // *Proc. Third Int. Workshop on the Analysis of MultiTemporal Remote Sensing Images.* 2005. P. 236–240.
179. Fujita T. Tornadoes and downbursts in the context of generalized planetary scales // *J. Atmos. Sci.*, 1981. V. 38, P. 1511–1534.
180. Gardiner B. et al. A review of mechanistic modelling of wind damage risk to forests // *Forestry.* 2008. V. 81(3). P. 447–463.

181. Gardiner B. et al. Destructive Storms in European Forests: Past and forthcoming Impacts. European Forest Institute, 2010. 138 p.
182. Gatzert C. A derecho in Europe: Berlin, 10 July 2002 // Wea. Forecasting. 2004. V. 19. P. 639–645.
183. Gatzert C.P., Fink A.H., Schultz D.M., Pinto J.G. An 18-year climatology of derechos in Germany // Nat. Hazards Earth Syst. Sci. 2020. V. 20(5). P. 1335–1351.
184. Gensini V.A., Mote T.L., Brooks H.E. Severe-thunderstorm reanalysis environments and collocated radiosonde observations // J. Appl. Meteor. Climatol. 2014. V. 53, P. 742–751.
185. Global Forest Change. Электронный ресурс: <https://glad.earthengine.app/view/global-forest-change> (дата обращения 10.01.2022).
186. Godfrey C.M., Peterson C.J. Estimating Enhanced Fujita Scale Levels Based on Forest Damage Severity // Wea. Forecasting. 2017. V. 32. P. 243–252.
187. Grams J.S. et al. A climatology and comparison of parameters for significant tornado events in the United States // Wea. Forecasting. 2012. V. 27(1), P. 106–123.
188. Gregow H., Laaksonen A., Alper M. E. Increasing large scale windstorm damage in Western, Central and Northern European forests, 1951–2010 // Scientific Reports. 2017. V. 7. Art. No. 46397.
189. Grieser J. Convection parameters. Электронный ресурс: <http://www.juergen-grieser.de/ConvectionParameters/ConvectionParameters.pdf> (дата обращения 10.01.2022).
190. Groenemeijer P. et al. Severe Convective Storms in Europe: Ten Years of Research and Education at the European Severe Storms Laboratory // Bull. Amer. Meteorol. Soc. 2017. V. 98(12). P. 2641–2651.
191. 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.
192. Hansen M.C. et al. High-Resolution Global Maps of 21st-Century Forest Cover Change // Science. 2013. V. 342. P. 850–853.

193. Hardisky M.A., Klemas V. Smart R.M. The influence of soil salinity, growth form, leaf moisture on the spectral radiance of *Spartina alterniflora* canopies // Photogramm. Eng. Remote Sens. 1983. V. 49. P. 77–83.
194. Hart E. et al. Use of machine learning techniques to model wind damage to forests // *Agricult. Forest Meteorol.* 2019. V. 265. P. 16–29.
195. Haylock M.R. European extra-tropical storm damage risk from a multi-model ensemble of dynamically-downscaled global climate models // *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 2011. V. 11. P. 2847–2857.
196. Hanstrum B.N., Mills G.A., Watson A., Monteverti J.P., Doswell C.A.III. The cool-season tornadoes of California and southern Australia // *Wea. Forecasting.* 2002. V. 17. P. 705–722.
197. Hermosilla T., Wulder M.A., White J.C., Coops N.C., Hobart G.W. Regional detection, characterization, and attribution of annual forest change from 1984 to 2012 using Landsat-derived time-series metrics // *Remote Sens. Environ.* 2015. V. 170. P. 121–132.
198. Hersbach H. et al. The ERA5 global reanalysis // *Quarterly J. Royal Meteorol. Soc.* 2020. V. 146. P. 1999–2049.
199. Hlásny T. et al. Bark Beetle Outbreaks in Europe: State of Knowledge and Ways Forward for Management // *Current Forestry Rep.* 2021. V. 7, P. 138–165.
200. Hong S.-Y., Dudhia J. Next-generation numerical weather prediction: Bridging parameterization, explicit clouds, and large eddies // *Bull. Amer. Meteor. Soc.* 2012. V. 93. ES6–ES9.
201. Hovi A., Raitio P., Rautiainen M. A spectral analysis of 25 boreal tree species // *Silva Fennica.* 2017. V. 51(4). Art. No. 7753.
202. Huo L.-Z., Boschetti L., Sparks A.M. Object-based classification of forest disturbance types in the conterminous United States // *Remote Sensing.* 2019. V. 11(5), Art. No. 477.
203. Jedlovec G.J., Nair U., Haines S.L. Detection of storm damage tracks with EOS data // *Wea. Forecasting.* 2006. V. 21. P. 249–267.

204. Jenkins M., Runyon J., Fettig C., Page W., Bentz B. Interactions among the mountain pine beetle, fires and fuels // *Forest Sci.* 2014. V. 60(3). P. 489–501.
205. Johns R.H., Hirt W.D. Derechos: Widespread convectively induced windstorms // *Wea. Forecasting.* 1987. V. 2. P. 32–49.
206. Jones T.A., Stensrud D., Wicker L., Minnis P., Palikonda R. Simultaneous radar and satellite data storm-scale assimilation using an ensemble kalman filter approach for 24 may 2011 // *Mon. Wea. Rev.* 2015. V. 143(1). P. 165–194.
207. Ikonen V.P. et al. Regional risks of wind damage in boreal forests under changing management and climate projections // *Canadian J. Forest Res.* 2017. V. 47(12). P. 1632–1645.
208. IPCC. Climate Change: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Masson-Delmotte V., Zhai P., Pirani A., Connors S.L., Péan C., Berger S., Caud N., Chen Y., Goldfarb L., Gomis M.I., et al. editors. New York, NY, USA: Cambridge University Press: Cambridge, UK; 2021. 1300 P.
209. Iwahashi J., Pike R. Automated classifications of topography from DEMs by an unsupervised nested-means algorithm and a three-part geometric signature // *Geomorphology.* 2007. V. 86. P. 409–440.
210. Kain J.S., Weiss S.J., Levit J.J., Baldwin M.E., Bright D.R., Examination of convection-allowing configurations of the WRF model for the prediction of severe convective weather: The SPC/NSSL Spring Program 2004 // *Wea. Forecasting.* 2006. V. 21(2). P. 167–181.
211. Kain J.S. et al. Some practical considerations regarding horizontal resolution in the first generation of operational convection-allowing NWP // *Wea. Forecasting.* 2008. V. 23(5). P. 931–952.
212. Karstens C.D., Gallus Jr. W.A., Lee B.D., Finley C.A. Analysis of tornado-Induced tree fall using aerial photography from the Joplin, Missouri and Tuscaloosa-Birmingham, Alabama, Tornadoes of 2011 // *J. Appl. Meteorol. Climatol.* 2013. V. 52(5). P. 1049–1068.

213. Kautz M., Meddens A. J. H., Hall R. J., Arneeth A. Biotic disturbances in Northern Hemisphere forests – a synthesis of recent data, uncertainties, implications for forest monitoring and modelling // *Global Ecol. Biogeogr.* 2017. V. 26. P. 533–552.
214. Kennedy R.E. et al. Attribution of disturbance change agent from Landsat time-series in support of habitat monitoring in the Puget Sound region, USA // *Remote Sens. Environ.* 2015, V. 166, P. 271–285.
215. Kerkmann J. et al. MSG Channels, Interpretation Guide, Weather, Surface Conditions, Atmospheric Constituents. 2006. URL: [http://oiswww.eumetsat.org/WEBOPS/msg\\_interpretation/index.html](http://oiswww.eumetsat.org/WEBOPS/msg_interpretation/index.html).
216. Kharuk V.I. et al. Climate-driven conifer mortality in Siberia // *Global Ecol. Biogeogr.* 2021. V. 30(2). P. 543–556.
217. Kislov D.E., Korznikov K.A. Automatic windthrow detection using very-high-resolution satellite imagery and deep learning // *Remote Sensing.* 2020. V. 12(7). Art. No. 1145.
218. Kislov D.E., Korznikov K.A., Altman J., Vozmishcheva A.S., Krestov P.V. Extending deep learning approaches for forest disturbance segmentation on very high-resolution satellite images // *Rem. Sens. in Ecology and Conservation.* 2021. V. 7(3). P. 355–368.
219. Klaes K.D. A status update on EUMETSAT programmes and plans // *Proc. SPIE – The Int. Soc. Optical Eng.* 2017. V. 10402, Art. No. 1040202.
220. Klaus M., Holsten A., Hostert P., Kropp J. Integrated methodology to assess windthrow impacts on forest stands under climate change // *Forest Ecol. Man.* 2011. V. 261. P. 1799–1810.
221. Korznikov K.A., Kislov D.E., Belyaeva N.G. The first record of catastrophic windthrow in boreal forests of South Sakhalin and the South Kurils (Russia) during October 2015 tropical cyclones // *Botanica Pacifica.* 2019. V. 8(1). P. 31–38.
222. Köster K., Voolma K., Jögiste K., Metslaid M., Laarmann, D. Assessment of tree mortality after windthrow using photo-derived data // *Annales Botanici Fennici.* 2009. V. 46(4). P. 291–298.

223. 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.
224. Krylov A. et al. Remote sensing estimates of stand-replacement fires in Russia, 2002 – 2011 // *Environ. Res. Letters*. 2014. V. 9(10). Art. no 105007.
225. Kunkel J., Hanesiak J., Sills D. The Hunt for Missing Tornadoes: Using Satellite Imagery to Detect and Document Historical Tornado Damage in Canadian Forests // *J. Applied Meteorol. Climatol.* 2023. Vol. 62(2). P. 139–154.
226. Kunz M. The skill of convective parameters and indices to predict isolated and severe thunderstorms // *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 2007. V. 7(2). P. 327–342.
227. 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.
228. Kwon Y.C., Hong S.-Y. A mass-flux cumulus parameterization scheme across gray-zone resolutions // *Mon. Wea. Rev.* V. 145(2). P. 583–598.
229. LAADS DAAC. Level-1 and Atmosphere Archive & Distribution System Distributed Active Archive Center. Электронный ресурс: <https://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov/search/> (дата обращения 10.01.2022).
230. Laapas M., Venäläinen A. Homogenization and trend analysis of monthly mean and maximum wind speed time series in Finland, 1959–2015 // *Int. J. Climatol.* 2017. V. 37. P. 4803–4813.
231. 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 Ecol. Man.* 2000. V. 135. P. 179–194.
232. León-Cruz J.F., Carbajal N., Pineda-Martínez L.F. Meteorological analysis of the tornado in Ciudad Acuña and Coahuila State, Mexico, on May 25, 2015 // *Nat. Hazards*. 2017. V. 89(1). P. 423–439.
233. Lim K-S., Hong S.-Y.6 Yoon J.-H., Han J. Simulation of the summer monsoon rainfall over East Asia using the NCEP GFS cumulus parameterization at different horizontal resolutions // *Wea. Forecasting*. 2014. V. 29. P. 1143–1154.

234. Lindemann J.D., Baker W.L. Using GIS to analyse a severe forest blowdown in the Southern Rocky Mountains // *Int. J. Geogr. Information Sci.* 2002. V. 16(4). 377–399.
235. Litta A.J. et al. Simulation of tornado over Orissa (India) on March 31, 2009, using WRF–NMM model // *Natural Hazards.* 2012. V. 61(3). P. 1219–1242.
236. Lompar M., Ćurić M., Romanic D. Implementation of a gust front head collapse scheme in the WRF numerical model // *Atmos. Res.* 2018. V. 203. P. 231–245.
237. Lupo A.R. et al. Changes in global blocking character in recent decades // *Atmosphere.* 2019. V 10(2). Art. No. 92.
238. Maddox R.A. Mesoscale convective complexes // *Bull. Amer. Meteor. Soc.* 1980. V. 61, P. 1374–1387.
239. Marion G.R., Trapp R.J. Controls of Quasi-Linear Convective System Tornado Intensity // *J. Atmos. Sci.* 2021. V. 78(4). P. 1189–1205.
240. Matsangouras I.T., Pytharoulis I., Nastos P.T. Numerical modeling and analysis of the effect of complex Greek topography on tornadogenesis // *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 2014. V. 14(7). P. 1905–1919.
241. McDowell N.G. et al. Global satellite monitoring of climate-induced vegetation disturbances // *Trends Plant Sci.* 2015. V. 20. P. 114–123.
242. McDowell N.G. et al. Pervasive shifts in forest dynamics in a changing world // *Science.* 2020. V. 368(6494). Art. No. aaz9463.
243. Mikuš P. Mahović N. Satellite-based overshooting top detection methods and an analysis of correlated weather conditions // *Atmos. Res.* 2013. V. 123. P. 268–280.
244. Mildrexler D.J., Zhao M., Running, S.W. Testing a MODIS Global Disturbance Index across North America // *Remote Sens. Environ.* 2009. V. 113. P. 2103–2117.
245. Mitchell S.J. Wind as a natural disturbance agent in forests: a synthesis // *Forestry.* 2013. V.86. P. 147–157.
246. Mokroš M. et al. Early stage forest windthrow estimation based on unmanned aircraft system imagery // *Forests.* 2017. V. 8(9), Art. No. 306.

247. Mohr S., Wandel J., Lenggenhager S., Martius O. Relationship between atmospheric blocking and warm-season thunderstorms over western and central Europe // *Quartely J. of Royal Meteorol. Soc.* 2019, V. 145, P. 3040–3056.
248. Mokhov I.I. Specific features of the 2010 summer heat formation in the European territory of Russia in the context of general climate changes, climate anomalies // *Izvestiya – Atm. Ocean Phys.*, 2011. V. 47(6), P. 653–660.
249. Molthan A.L., Bell J.R., Cole T.A., Burks J.E. Satellite-based identification of tornado damage tracks from the 27 April 2011 severe weather outbreak // *J. Oper. Meteorol.* 2014. V. 2. P. 191–208.
250. Myint S.W., Yuan M., Cervený R.S., Giri C. Comparison of remote sensing image processing techniques to identify tornado damage areas from Landsat TM data // *Sensors.* 2008. V. 8. P. 1128–1156.
251. Napolitano E., Marchesini I., Salvati P., Donnini M., Bianchi C., Guzzetti F. LAND-deFeND – An innovative database structure for landslides, floods, their consequences // *J. Environ. Man.* 2018. Vol. 207. P. 203–218.
252. National Severe Storms Laboratory (NSSL). Электронный ресурс: <https://www.nssl.noaa.gov/education/svrwx101/thunderstorms/types/> (дата обращения 10.01.2022).
253. National Weather Service (NWS). What is a Supercell? Электронный ресурс: <https://www.weather.gov/ama/supercell>. (дата обращения 10.01.2022).
254. NEXTGIS – Выгрузка данных из OSM (OpenStreetMap). Электронный ресурс: <https://nextgis.ru/services/dataosm/> (дата обращения 10.01.2022).
255. Nielsen A.A., Conradsen K., Simpson J.J. Multivariate alteration detection (MAD) and MAF postprocessing in multispectral and bitemporal image data: New approaches to change detection studies // *Rem. Sens. Environ.* 1998. V. 64(1). P. 1–19.
256. Nilsson C. et al. Recorded storm damage in Swedish forests 1901–2000 // *Forest Ecol. Man.* 2004. V. 199(1). P. 165–173.

257. NOAA Climate Prediction Center. Электронный ресурс: [https://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/precip/CWlink/daily\\_ao\\_index/teleconnections.shtml](https://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/precip/CWlink/daily_ao_index/teleconnections.shtml) (дата обращения 10.01.2022).
258. Quine C.P., Gardiner B.A. Understanding how the interaction of wind, trees results in windthrow and stem breakage and canopy gap formation. In *Plant Disturbance Ecology: The Process and the Response*. Johnson E., Miyaniishi K. (eds). Elsevier Acad. Press, Amsterdam. 2007. P. 103–156.
259. Oeser J., Pflugmacher D., Senf C., Heurich M., Hostert P. Using intra-annual Landsat time series for attributing forest disturbance agents in Central Europe // *Forests*. 2017. V. 8(7). Art. No. 251.
260. Orlanski I. A rational subdivision of scales for atmospheric processes // *Bull. Amer. Meteor. Soc.* 1975. V. 56. P. 527–530.
261. Overpeck J.T., Rind D., Goldberg, R. Climate-induced changes in forest disturbance and vegetation // *Nature*. 1990. V. 343. P. 51–53.
262. Peltola H., Kellomäki S., Väisänen H., Ikonen V.P. A mechanistic model for assessing the risk of wind, snow damage to single trees and stands of Scots pine, Norway spruce and birch // *Canadian J. of Forest Res.* 1999. V. 29(6). P. 647–661.
263. Piper D., Kunz M. Spatiotemporal variability of lightning activity in Europe and the relation to the North Atlantic Oscillation teleconnection pattern // *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 2017. V. 17. P. 1319–1336.
264. Piper D.A., Kunz M., Allen J.T., Mohr S. Investigation of the temporal variability of thunderstorms in central and western Europe and the relation to large-scale flow and teleconnection patterns // *Quarterly J. Royal Meteorol. Soc.* 2019. V. 145(725). P. 3644–3666.
265. Pirotti F. et al. Kernel feature cross-correlation for unsupervised quantification of damage from windthrow in forests // *ISPRS Archives*. 2016. V. 41. P. 17–22.
266. Potapov P.V. et al. Eastern Europe's forest cover dynamics from 1985 to 2012 quantified from the full Landsat archive // *Rem. Sens. Environ.* 2015. V. 159. P. 28–43.

267. Potapov P. et al. The last frontiers of wilderness: Tracking loss of intact forest landscapes from 2000 to 2013 // *Sci. Advances*. 2017. V. 3(1), Art. No. e1600821
268. Powers J.G. et al. The Weather Research and Forecasting Model: Overview, System Efforts and future directions // *Bull. Amer. Met. Soc.* 2017. Vol. 98. P. 1717–1737.
269. Púčik T.P., Groenemeijer P., Rýva D., Kolář M. Proximity soundings of severe and nonsevere thunderstorms in central Europe // *Mon. Wea. Rev.* 2015. V. 143. P. 4805–4821.
270. Punge H., Bedka K., Kunz M., Werner A. A new physically based stochastic event catalog for hail in Europe // *Nat. Hazards*. 2014. V. 73(3). P. 1625–1645.
271. Punge H.J., Bedka K.M., Kunz M., Reinbold A. Hail frequency estimation across Europe based on a combination of overshooting top detections and the ERA-INTERIM reanalysis // *Atmos. Res.* 2017. V. 198. P. 34–43.
272. Punkka A.-J., Teittinen J., Johns R.H. Synoptic and mesoscale analysis of a high-latitude derecho-severe thunderstorm outbreak in Finland on 5 July 2002 // *Wea. Forecasting*, 2006. V. 21(5). P. 752–763.
273. Putsay M., Simon A., Szenyán I., Kerkmann J., Horváth G. Case study of the 20 May 2008 tornadic storm in Hungary – Remote sensing features and NWP simulation // *Atmos. Res.* 2011. V. 100(4). P. 657–679.
274. Radler T., Groenemeijer P., Faust E., Sausen R., Púčik T. Frequency of severe thunderstorms across Europe expected to increase in the 21st century due to rising instability // *NPJ Clim. Atmos. Sci.* 2019. V. 2. Art. No. 30.
275. Radová M., Seidl J. Parallax applications when comparing radar and satellite data. The 2008 EUMETSAT Meteorological Satellite Conference, 2008. Darmstadt, Germany. ISBN: 978-92-9110-082-8. EUMETSAT P.52, ISSN 1011-3932.
276. Rasmussen E.N. Refined Supercell and Tornado Forecast Parameters // *Wea. Forecasting*, 2003, V. 18, P. 530–535.

277. Rasmussen E.N., Blanchard D.O. A Baseline Climatology of Sounding-Derived Supercell and Tornado Forecast Parameters // *Wea. Forecasting*. 1998. V. 13, P. 1148–1164.
278. Reynolds D.W. Observations of damaging hailstorms from geosynchronous satellite digital data // *Mon. Wea. Rev.* 1980. V. 108, P. 337–348.
279. Rodríguez O., Bech J. Reanalysing strong-convective wind damage paths using high-resolution aerial images // *Nat. Hazards*. 2020. V. 104(1), P. 1021–1038.
280. Rodríguez O. et al. An overview of tornado and waterspout events in Catalonia (2000–2019) // *Atmos. Res.* 2021. V. 250. Art. No. 105415.
281. 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. of Photogram. Rem. Sens.* 2012. V. 67(1). P. 93–104.
282. Rotunno R., Klemp J.B., Weisman M.L. A Theory for strong, Long-Lived Squall Lines // *J. Atmos. Sci.* 1988. V. 45(3). P. 463–485.
283. Saad C. et al. Potential impact of climate change on the risk of windthrow in eastern Canada's forests // *Clim. Change*. 2017. V. 143(3-4). P. 487–501.
284. SAGA – System for Automated Geoscientific Analysis. Электронный ресурс: <http://www.saga-gis.org/en/index.html> (дата обращения 10.01.2022).
285. Saha S. et al. The NCEP climate forecast system reanalysis // *Bull. Amer. Meteorol. Soc.* 2010. V. 91, P. 1015–1057.
286. Sayn-Wittgenstein L., Wightman J.M., Landsat application in Canadian forestry // *Proceeding of the 10th Int Symp on Remote Sensing of Environment*. 1975. V. 2. P. 1209–1218.
287. Schelhaas M.-J., Nabuurs G.-J., Schuck A. Natural disturbances in the European forests in the 19th and 20th centuries // *Glob. Change Biol.* 2003. V. 9(11) P. 1620–1633.
288. 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) // *Int. J. Biometeorol.* 2012. V. 56. P. 57–69.

289. Sebold J., Senf C., Seidl R. Human or natural? Landscape context improves the attribution of forest disturbances mapped from Landsat in Central Europe // *Remote Sens. Environ.* 2021. V. 262. Art. No. 112502.
290. Seidl R. et al. Modelling natural disturbances in forest ecosystems: A review // *Ecol. Modelling.* 2011. V. 222(4). P. 903–924.
291. Seidl R., Schelhaas M.J., Lexer M.J., Unraveling the drivers of intensifying forest disturbance regimes in Europe // *Glob. Change Biol.* 2011. V. 17(9). P. 2842–2852.
292. Seidl R., Schelhaas M.-J., Rammer W., Verkerk P.J. Increasing forest disturbances in Europe, their impact on carbon storage // *Nat. Clim. Change.* 2014. V. 4. P. 806–810.
293. Seidl R. et al. Forest disturbances under climate change // *Nat. Clim. Change.* 2017. V. 7(6), P. 395–402.
294. Senf C., Pflugmacher D., Hostert P., Seidl R. Using Landsat time series for characterizing forest disturbance dynamics in the coupled human and natural systems of Central Europe // *ISPRS J. Photogramm. Remote Sens.* 2017. V. 130. P. 453–463.
295. Senf C., Buras A., Zang C.S., Rammig A., Seidl R. Excess forest mortality is consistently linked to drought across Europe // *Nature Communications.* 2020. V. 11(1), Art. No. 6200.
296. Senf C., Seidl R. Mapping the forest disturbance regimes of Europe // *Nature Sustainability.* 2021a. V. 4. P. 63–70.
297. Senf C., Seidl R. Storm and fire disturbances in Europe: Distribution and trends // *Glob Change Biol.* 2021b. V. 27. P. 3605–3619.
298. Setvák M. et al. Satellite-observed cold-ring-shaped features atop deep convective clouds // *Atmos. Res.* 2010. V. 97(1-2). P. 80–96.
299. Schenkman A.D., Xue M., Hu M. Tornadogenesis in a high-resolution simulation of the 8 May 2003 Oklahoma City supercell // *J. Atmos. Sci.* 2014. V. 71(1). P. 130–154.
300. Sherburn K.D., Parker M.D. Climatology, ingredients of significant severe convection in high-shear, low-CAPE environments // *Wea. Forecasting.* 2014. V. 29, P. 854–877.

301. Sherburn K.D., Parker M.D., King J.R., Lackmann G.M. Composite environments of severe and nonsevere high-shear, low-CAPE convective events // *Wea. Forecasting*. 2016. V. 31(6), P. 1899–1927.
302. Shikhov A.N., Chernokulsky A.V. A satellite-derived climatology of unreported tornadoes in forested regions of northeast Europe // *Rem. Sens. Environ.* 2018. V. 204. P. 553–567.
303. 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 Syst. Sci. Data*. 2020. V. 12. P. 3489–3513.
304. Shikhov A., Chernokulsky A., Kalinin N., Bykov A., Pischalnikova E. Climatology and Formation Environments of Severe Convective Windstorms and Tornadoes in the Perm Region (Russia) in 1984–2020 // *Atmosphere*. 2021. V. 12(11). Art. No. 1407.
305. 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 // *Nat. Hazards*. 2019. Vol. 97(1), P. 283–308.
306. Schroeder T.A. et al. Testing a Landsat-based approach for mapping disturbance causality in U.S. forests. // *Remote Sens. Environ.* 2017, V. 195. P. 230–243.
307. Sills D.M.L. et al. The northern tornadoes project: Uncovering Canada's true tornado climatology // *Bull. Amer. Meteorol. Soc.* 2020. V. 101(12). P. E2113–E2132.
308. Sobash R.A. et al. Probabilistic forecast guidance for severe thunderstorms based on the identification of extreme phenomena in convection-allowing model forecasts // *Wea. Forecasting*. 2011. V. 26. P. 714–728.
309. Sobash R.A., Romine G.S., Schwartz G.S. Explicit Forecasts of Low-Level Rotation from Convection-Allowing Models for Next-Day Tornado Prediction // *Wea. Forecasting*. 2016. V. 31. P. 1591–1614.
310. Solari G. Thunderstorm Downbursts and Wind Loading of Structures: Progress and Prospect // *Frontiers in Built Environ.* 2020. V. 6. Art. No. 63.
311. Sounding Data Archive. Электронный ресурс: <http://weather.uwyo.edu/upperair/np.html> (дата обращения 10.01.2022).

312. Stratman D.R., Brewster K.A. Sensitivities of 1-км forecasts of 24 May 2011 tornadic supercells to microphysics parameterizations // *Mon. Wea. Rev.* 2017. V. 145(7). P. 2697–2721.
313. SRTM-90 digital elevation database. Электронный ресурс: <https://bigdata.cgiar.org/srtm-90m-digital-elevation-database/> (дата обращения 10.01.2022).
314. 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 Ecol. Man.* 2016. V. 381. P. 17–28.
315. Suvanto S., Peltoniemi M., Tuominen S., Strandström M., Lehtonen A. High-resolution mapping of forest vulnerability to wind for disturbance-aware forestry // *Forest Ecol. Man.* 2019. V. 453. Art. No. 117619.
316. Takano K. et al. Projection of impacts of climate change on windthrows and evaluation of potential adaptation measures in forest management: A case study from empirical modelling of windthrows in Hokkaido, Japan, by Typhoon Songda // *Hydrol. Res. Letters.* 2016. V. 10(4). P. 132–138.
317. Taszarek M., Brooks H.E., Czernecki B. Sounding-derived parameters associated with convective hazards in Europe // *Mon. Wea. Rev.* 2017. Vol. 145. P. 1511–1528.
318. Taszarek M., Czernecki B., Walczakiewicz S., Mazur A., Kolendowicz L. An isolated tornadic supercell of 14 July 2012 in Poland – A prediction technique within the use of coarse-grid WRF simulation // *Atmos. Res.* 2016. V. 178–179. P. 367–379.
319. Taszarek M. et al. Derecho evolving from a Mesocyclone—A Study of 11 August 2017 severe weather outbreak in Poland: Event analysis and high-resolution simulation // *Mon. Wea. Rev.* 2019. V. 147(6). P. 2283–2306.
320. Taszarek M. et al. Comparison of Convective Parameters Derived from ERA5 and MERRA-2 with Rawinsonde Data over Europe and North America // *J. Climate.* 2021. V. 34(8). P. 3211–3237.
321. Taszarek, M. et al. Severe convective storms across Europe and the United States. Part I: Climatology of lightning, large hail, severe wind, and tornadoes // *J. Clim.* 2020a. V. 33. P. 10239–10261

322. Taszarek M., Allen J.T., Púcik T., Hoogewind K.A., Brooks H.E. Severe convective storms across Europe and the United States. Part II: ERA5 environments associated with lightning, large hail, severe wind, and tornadoes // *J. Climate*. 2020. V. 33(24). P. 10263–10286.
323. The International Fujita (IF) Scale. Tornado and Wind Damage Assessment Guide. Электронный ресурс: [https://www.essl.org/media/publications/IF-scale\\_v0.10.pdf](https://www.essl.org/media/publications/IF-scale_v0.10.pdf) (дата обращения 10.01.2022).
324. Thompson R.L., Edwards R., Hart J.A., Elmore K.L., Markowski P. Close proximity soundings within supercell environments obtained from the Rapid Update Cycle // *Wea. Forecasting*. 2003. V.18. P. 1243–1261.
325. Thorn S., Bässler C., Svoboda M., Müller J. Effects of natural disturbances and salvage logging on biodiversity—Lessons from the Bohemian Forest // *For. Ecol. Manag.* 2017. V. 388. P. 113–119.
326. Tyukavina A. et al. Global Trends of Forest Loss Due to Fire From 2001 to 2019. *Front. Remote Sens.* 2022. V. 3. P. Art. No. 825190.
327. Tyrrell J. Winter tornadoes in Ireland: The case of the Athlone tornado of 12 January 2004 // *Atmos. Res.* 2007. V. 83. P. 242–253.
328. Ulanova N.G. The effects of windthrow on forests at different spatial scales: a review // *Forest Ecol. Man.* 2000. V. 135. P. 155–167.
329. Usbeck T. et al. Increasing storm damage to forests in Switzerland from 1858 to 2007 // *Agricult. Forest Meteorol.* 2010. V. 150(1). P. 47–55.
330. USGS EarthExplorer. Электронный ресурс: <https://earthexplorer.usgs.gov/> (дата обращения 10.01.2022).
331. Varentsov M., Wouters H., Platonov V., Konstantinov P. Megacity-induced mesoclimatic effects in the lower atmosphere: A modeling study for multiple summers over Moscow, Russia // *Atmosphere*. 2018. V. 9(2). Art. No. 50.
332. Venäläinen A. et al. Climate change induces multiple risks to boreal forests and forestry in Finland: A literature review // *Glob. Change Biol.* 2020. V. 26 (8), P. 4178-4196.
333. Wagner M. et al. Unpiloted Aerial Systems (UASS) application for tornado damage surveys benefits and procedures // *Bull. Amer. Meteorol. Soc.* 2019. V. 100(12). P. 2405–2409.

334. Wang W., Qu J.J., Hao X., Liu Y., Stanturf J.A. Post-hurricane forest damage assessment using satellite remote sensing // *Agricult. Forest Meteorol.* 2010. V. 150. P. 122–132.
335. Wang F., Xu Y.J. Comparison of remote sensing change detection techniques for assessing hurricane damage to forests // *Environ. Monitor. Assess.* 2010. V. 162. P. 311–326.
336. Weaver J., Knaff J., Bikos D., Wade G., Daniels J. Satellite Observations of a Severe Supercell Thunderstorm on 24 July 2000 Made during the GOES-11 Science Test // *Wea. Forecasting.* 2002. V. 17. P. 124–138.
337. Weisman M.L., Davis C., Wang W., Manning K.W., Klemp J.B. Experiences with 0–36-h explicit convective forecasts with the WRF-ARW model // *Wea. Forecasting.* 2008. V. 23(3). P. 407–437.
338. Westerling A.L., Hidalgo H.G., Cayan D.R., Swetnam T.W. Warming and earlier spring increase western U.S. forest wildfire activity // *Science.* 2006. V. 313. P. 940–943.
339. Royal Meteorological Society. Электронный ресурс: <https://www.rmets.org/metmatters/what-are-convective-storms> (дата публикации 10.06.2020, обращения 10.01.2022).
340. Wind Science and Engineering Center (WSEC). A recommendation for an enhanced Fujita scale (EF-scale). Электронный ресурс: <https://www.spc.noaa.gov/faq/tornado/EFScale.pdf> (дата обращения 10.01.2022).
341. Wulder M.A., Masek J.G., Cohen W.B., Loveland T.R., Woodcock C.E. Opening the archive: how free data has enabled the science and monitoring promise of Landsat // *Remote Sens. Environ.* 2012. V. 122. P. 2–10.
342. Xue M., Wang D., Gao, J., Brewster K., Droegemeier K.K. The Advanced Regional Prediction System (ARPS), storm-scale numerical weather prediction and data assimilation // *Meteorol. Atmos. Phys.* 2003. V. 82, P. 139–170.
343. Yuan M., Dickens-Micozzi M., Magsig M.A. Analysis of tornado damage tracks from the 3 May tornado outbreak using multispectral satellite imagery // *Wea. Forecasting.* 2002. V. 17. P. 382–398.

## ПРИЛОЖЕНИЯ

Приложение

Структура атрибутивного описания элементарных поврежденных участков, ветровалов и штормовых событий

### Структура атрибутивного описания элементарных участков ветровалов

Имя поля	Псевдоним поля	Тип, длина поля	Описание
OBJECTID	OBJECTID	идентификатор	Номер элементарного участка
ID	Windthrow ID	целочисленное	Идентификатор ветровала, к которому относится элементарный участок
Storm_ID	ID of storm event	целочисленное	ID идентификатор трека штормового события, к которому относится элементарный участок
Area	Area (km <sup>2</sup> )	десятичное	Площадь элементарного участка (км <sup>2</sup> )

### Структура атрибутивного описания ветровалов

Имя поля	Псевдоним поля	Тип, длина поля	Описание
OBJECTID	OBJECTID	идентификатор	Номер ветровала
ID	Windthrow ID	целочисленное	Идентификатор ветровала
Storm_ID	ID of storm event	целочисленное	Идентификатор трека штормового события, к которому относится ветровал
Storm_type	Type of storm	текстовое, 10	Тип явления, которое вызвало ветровал – шквал, торнадо, неконвективный шторм, снегопад

Имя поля	Псевдоним поля	Тип, длина поля	Описание
Certainty	Event certainty degree	текстовое, 20	Степень достоверности определения типа (высокая или средняя)
Source_1	Data source for windthrow delineation	текстовое, 50	Источник данных, по которому выделен ветровал (снимки Landsat, Sentinel-2, данные Global Forest Change, снимки сверхвысокого разрешения и т.д.)
Source_2	Data source for windthrow type defining	текстовое, 100	Источник данных для определения типа ветровала (снимки Landsat, Sentinel-2, данные Global Forest Change, снимки сверхвысокого разрешения, данные очевидцев явления)
Year	Year	целочисленное	Год
Month	Month	целочисленное	Месяц
Date	Storm event date	текстовое, 20	Дата ветровала
Date_1	Date of first image	дата	Дата последнего снимка Landsat/Sentinel-2, полученного до ветровала
Date_2	Date of second image	дата	Дата первого снимка Landsat/Sentinel-2, полученного после ветровала
Time_range	Time range	текстовое, 50	Время, в которое произошел ветровал (диапазон по UTC)
Time_Src	Data source for determine storm time range	текстовое, 255	Источник данных, по которому определено время штормового события (данные метеостанций, данные очевидцев и пр.)
N_polygons	Number of single-part polygons	целочисленное	Количество элементарных участков
Area	Area (km <sup>2</sup> )	десятичное	Площадь ветровала (км <sup>2</sup> )

Имя поля	Псевдоним поля	Тип, длина поля	Описание
Length	Path length (km)	десятичное	Длина ветровала (км)
Mean_width	Mean width of windthrow excluding gaps (m)	десятичное	Средняя ширина ветровала (м) – без учета разрывов
Max_width	Max width of windthrow excluding gaps (m)	десятичное	Максимальная ширина ветровала (м) – без учета разрывов
Mean_w_2	Mean width of windthrow with gaps (m)	десятичное	Максимальная ширина ветровала (м) – с учетом разрывов
Max_w_2	Max width of windthrow with gaps (m)	десятичное	Максимальная ширина ветровала (м) – с учетом разрывов
Direction	Direction of windthrow	текстовое, 10	Направление ветровала (направление движения шторма)
Near_WS	WMO ID of the weather station	целочисленное	Идентификатор (WMO ID) ближайшей метеостанции (если расстояние от ветровала до нее менее 50 км или она лежит на треке ветровала)
WS_dist	Distance to weather station (km)	десятичное	Расстояние до ближайшей метеостанции (км)
Wind_gust	Wind gust (m/s)	целочисленное	Максимальный порыв ветра, отмеченный на метеостанции в день, когда произошел ветровал
Gust_time	Wind gust time (UTC)	целочисленное	Время, когда был отмечен максимальный порыв ветра (с точностью 3 ч)
Sum_prec	Precipitation amount	целочисленное	Количество осадков на метеостанции в день, когда произошел ветровал (только для событий с количеством осадков $\geq 30$ мм/12 ч)

Имя поля	Псевдоним поля	Тип, длина поля	Описание
WS_comment	Additional data from weather station	текстовое, 100	Дополнительная информация о штормовом событии по данным метеостанции (если наблюдался сильный ливень, крупный град, смерч)
URL	External URL	текстовое, 100	Ссылка на внешний источник информации о штормовом событии (сообщения в СМИ, фото или видео)

### Структура атрибутивного описания штормовых событий

Имя поля	Псевдоним поля	Тип, длина поля	Описание
OBJECTID	OBJECTID	Object ID	Номер трека штормового события
Storm_ID	ID of storm event	целочисленное	Идентификатор трека штормового события
Count	Number of windtows	целочисленное	Количество ветровалов, связанных со штормовым событием
Area_tr	Area (km2)	десятичное	Суммарная площадь ветровалов (км <sup>2</sup> )
Length_tr	Path length (km)	десятичное	Общая длина трека, включая разрывы, км
Mean_w_tr	Mean width of storm track (m)	десятичное	Средняя ширина трека (км)
Max_w_tr	Max width of storm track (m)	десятичное	Максимальная ширина трека (км)

Научное издание

Шихов Андрей Николаевич  
Чернокульский Александр Владимирович  
Калинин Николай Александрович  
Пьянков Сергей Васильевич

**Ветровалы**  
**в лесной зоне России**  
**и условия их возникновения**

Монография

Издается в авторской редакции  
Компьютерная вёрстка: Александра Ташкинова

Подписано в печать 18.08.2023. Формат \_\_\_\_  
Усл. печ. л. \_\_\_\_ . Тираж \_\_\_\_ экз. Заказ \_\_\_\_

Пермский государственный национальный  
исследовательский университет  
Управление издательской деятельности  
614068, г. Пермь, ул. Букирева, 15

Отпечатано в типографии  
Адрес