МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное автономное образовательное
учреждение высшего образования
«ПЕРМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

На правах рукописи

Семакина Анастасия Владимировна

РИСК ВЕТРОВАЛОВ В ЛЕСНОЙ ЗОНЕ ЕВРОПЕЙСКОЙ ТЕРРИТОРИИ РОССИИ

1.6.21 - Геоэкология

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание ученой степени

кандидата географических наук

Научный руководитель:
доктор географических наук,
профессор А. Н. Шихов

Пермь 2026

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ....4
ГЛАВА 1. ОЦЕНКА И КАРТОГРАФИРОВАНИЕ ЕСТЕСТВЕННЫХ НАРУШЕНИЙ ЛЕСНЫХ ЭКОСИСТЕМ: СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ИССЛЕДОВАНИЙ....11
1.1. Нарушения лесного покрова и вызывающие их факторы....11
1.2. Современные подходы к оценке и картографированию уязвимости лесов к воздействию ветра.....16
1.2.1. Оценка повторяемости экстремальных метеорологических явлений 16
1.2.2. Оценка уязвимости древостоев....19
1.2.3 Оценка риска и ущерба....24
1.3. Исследования ветровалов в России....25
1.4. Выводы по главе 1....29
ГЛАВА 2. КАРТОГРАФИРОВАНИЕ УЯЗВИМОСТИ ЛЕСОВ К ВЕТРОВОМУ ВОЗДЕЙСТВИЮ НА ОСНОВЕ СПУТНИКОВЫХ ДАННЫХ (НА ПРИМЕРЕ ПЕРМСКОГО КРАЯ)....31
2.2. Создание карты растительности Пермского края....31
2.2. Формирование базы данных предикторов для оценки уязвимости лесов 44
2.3. Расчет уязвимости лесов и оценка его достоверности....52
2.4. Типизация лесов Пермского края по условиям возникновения ветровалов....67
2.5. Оценка комплексного воздействия ветровалов и других видов нарушений лесного покрова....74
2.6. Выводы по главе 2....78
ГЛАВА 3. ОБЗОРНОЕ КАРТОГРАФИРОВАНИЕ РИСКА ВЕТРОВАЛОВ НА ЕВРОПЕЙСКОЙ ТЕРРИТОРИИ РОССИИ....81
3.1. Формирование базы данных предикторов для оценки риска....81
3.2. Картографирование риска ветровалов....91
3.3. Вывод по главе 3....103
ЗАКЛЮЧЕНИЕ....106
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ....109
Приложение 1. Карта растительности Пермского края....127

Приложение 2. Гистограммы распределения предикторов ветровалов 128
Приложение 3. Тепловая карта матрицы корреляции для всех ячеек с ветровалами (коэффициент Спирмена) 130
Приложение 4. Карта уязвимости лесов Пермского края к ветровалам (на основе карты растительности Пермского края) 131
Приложение 5. Карта уязвимости лесов Пермского края к ветровалам (на основе глобальной карты растительности) 132
Приложение 6. Типизация лесов Пермского края по степени уязвимости к ветровалам 133
Приложение 7. Расчетный риск ветровалов в лесной зоне ЕТР по данным модели случайного леса 134
Приложение 8. Расчетный риск ветровалов в лесной зоне ЕТР по данным модели градиентного бустинга 135

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования. Ветровалы являются одним из значимых видов нарушений лесного покрова, особенно в странах Центральной и Северной Европы и на Европейской территории России (ЕТР). Они наносят существенный ущерб лесному хозяйству, который в отдельные годы может исчисляться десятками тысяч гектаров. Современное потепление климата может способствовать изменению как частоты и интенсивности метеорологических явлений, вызывающих ветровалы, так и устойчивости лесных экосистем к воздействию ветра. В связи с этим, оценке риска ветровалов и их прогнозированию посвящено множество исследований во многих странах мира. Такие оценки являются важным источником информации, необходимой в управлении лесными ресурсами и охране окружающей среды. Карты риска ветровалов применяются для изучения динамики изменения лесных насаждений, для оценки влияния ветровалов на биоразнообразие и экосистемы.

Прикладная значимость создания карт риска ветровалов, как и других видов нарушений лесного покрова, обусловлена тем, что они используются для разработки стратегий адаптации лесного хозяйства к воздействию опасных природных явлений и изменению климата. Оценки риска применяются при планировании лесохозяйственных мероприятий (выборочных и санитарных рубок, создания защитных полос вдоль дорог, линий электропередач и т.д.). Такие карты могут использоваться и при определении условий страхования имущественных рисков лесопользователей и установлении страховых премий.

Степень разработанности темы. Обнаружение и картографирование нарушений лесного покрова природного и антропогенного происхождения, в том числе и ветровалов, в настоящее время в основном выполняется по данным спутниковой съемки. Характерные признаки ветровалов на спутниковых снимках различного пространственного разрешения изучены

достаточно детально. Они рассматривались в работах А.М. Крылова и Н.А. Владимировой, А.Н. Шихова и А.В. Чернокульского, И.Н. Петухова, Д.Е. Кислова и К.А. Корзникова. Наиболее значимые результаты в области картографирования ветровалов получены на основе многолетнего ряда спутниковых снимков Landsat с пространственным разрешением 30 м, которые доступны за период с 1984 г. до настоящего времени. Тематические продукты Global Forest Change и Eastern'Europe Forest Cover Change, созданные лабораторией Global Land Analysis and Discovery (GLAD) Мэрилендского университета, содержат информацию о нарушениях лесного покрова в глобальном масштабе за период с 2001 г., и для территории Восточной Европы за 1986-2012 гг. соответственно. На их основе, а также с использованием снимков Landsat, созданы картографические базы данных ветровалов для территории Европы (Senf and Seidl, 2021) и лесной зоны России (Шихов и др., 2023). В последние 10 лет многие работы основаны на более детальных данных со спутников Sentinel-2, в том числе созданы сервисы для автоматического выделения ветровалов (ТерраТех, 2024).

Определению факторов уязвимости лесов к ветровалам посвящено множество исследований. В настоящее время выделяют три группы факторов: факторы местоположения, характеристики насаждений и особенности лесопользования. Для лесной зоны России эти факторы анализировались в работах Е.Б., Скворцовой, Н.Г. Улановой, И.Н. Петухова (на Европейской территории России), а также Ю.М. Алесенкова, R. Lassig и S.A Mochalov (для территории Среднего Урала). Факторы, определяющие уязвимость лесов к ветровалам, лежат в основе оценки риска ветровалов. Однако для территории России оценки риска ветровалов на уровне всей страны или крупных регионов ранее не проводились.

Методы оценки риска ветровалов и его составляющих (опасности, подверженности и уязвимости) хорошо разработаны для территории стран Северной, Центральной и Западной Европы, где ветровалы являются основным природным фактором нарушений лесного покрова (Schelhaas et al.,

2003). Оценки риска ветровалов, полученные с помощью статистических методов, машинного обучения или механистических моделей, описывающих воздействие ветровой нагрузки на отдельные деревья или сообщества, представлены в работах B.A. Gardiner, H. Peltola и S. Kellomaki, S. Suvanto, O. Panferov, A. Sogachev, L. Krejci, R. Seidl, M. Dobbertin, M. Hanewinkel, A. Venäläinen и других авторов. Картографирование риска ветровалов и/или уязвимости лесов к воздействию ветра производилось как применительно к отдельным событиям, так и для территории целых стран, в частности для Финляндии. Однако для территории России в силу ряда причин (в частности, отсутствия до недавнего времени необходимых исходных данных о ветровалах за многолетний период) такие работы имеют единичный характер. Опыт картографирования риска ветровалов для крупных регионов практически отсутствует.

Объектом исследования являются ветровалы в лесной зоне Европейской территории России (ЕТР).

Предметом исследования является риск возникновения ветровалов в лесной зоне ЕТР, его состав и структура.

Цель исследования состоит в получении объективных оценок и создании карт риска ветровалов на основе открытых данных для лесной зоны ЕТР и более детально – для Пермского края.

Для достижения поставленной цели решены следующие задачи:

- изучить мировой опыт оценки и картографирования уязвимости лесов к ветровому воздействию и риска ветровалов;
- уточнить основные факторы, определяющие уязвимость лесов к ветровому воздействию и оценить их значимость на изучаемой территории;
- создать карту растительности Пермского края на основе снимков со спутников серии Landsat и тематических продуктов их обработки, и оценить ее достоверность;
- оценить уязвимость лесов Пермского края к ветровому воздействию, учитывая комплекс характеристик лесных насаждений и рельефа на основе

общедоступных спутниковых данных и продуктов их обработки, а также получить оценку достоверности полученных результатов;

- оценить риск возникновения ветровалов как произведение опасности, подверженности и уязвимости, провести верификацию полученного результата и построить обзорную карту риска ветровалов в лесной зоне ЕТР;
- оценить возможное комплексное воздействие ветровалов и других видов нарушений лесного покрова (пожаров и усыхания лесов) для территории Пермского края.

Научная новизна исследования заключается в следующем:

– создана спутниковая карта растительности Пермского края, отличающаяся от существующих аналогов как пространственным разрешением, так и высокой тематической детальностью. Она имеет пространственное разрешение 30 м и включает 19 тематических классов, 11 из которых включают информацию о лесной растительности;

– впервые на основе открытых спутниковых данных создана база данных характеристик предикторов, используемых для оценки уязвимости лесов и риска ветровалов. Проведена оценка значимости факторов, определяющих уязвимость лесов и риск возникновения ветровала. Установлено, что наиболее значимыми предикторами на исследуемой территории являются высота древостоев и запас древесины.

– на основе методов машинного обучения (случайного леса и градиентного бустинга) впервые выполнена оценка уязвимости лесов Пермского края к ветровому воздействию и создана соответствующая карта. Также на основе аналогичных методов, но более широкого набора предикторов выполнена оценка составляющих риска ветровалов (опасности, подверженности и уязвимости) для лесной зоны ЕТР и впервые создана карта риска ветровалов.

Обоснованность и достоверность результатов обеспечивается содержательными и формальными требованиями к выбору исходных данных. Исследование основано на открытых данных, которые являются наиболее

надежными среди имеющихся информационных ресурсов. Достоверность результатов также определяется выбором методов, которые доказали свою эффективность при проведении аналогичных исследований в разных странах мира, в том числе в регионах таежной зоны. Сопоставление расчетной и фактической доли площади ветровалов также показало достаточно высокую корреляцию между ожидаемыми и фактическими значениями.

Диссертационное исследование основано на применении следующих основных *методов*: автоматизированного и визуального дешифрирования спутниковых снимков для получения информации о породном составе насаждений, методов пространственного анализа в ГИС для оценки предикторов, методов машинного обучения для оценки уязвимости лесов и риска ветровалов, статистических методов для оценки точности результатов, методов картографии для представления результатов.

Положения, выносимые на защиту:

Созданная на основе спутниковых снимков Landsat и тематических продуктов их обработки карта растительности Пермского края обеспечивает необходимую пространственную и тематическую детальность для оценки уязвимости лесов к ветровому воздействию.

Уязвимость лесов к ветровому воздействию в наибольшей степени определяется свойствами самих насаждений − запасом древесины, высотой древостоя и преобладающими породами, которые в значительной степени определяются возрастом насаждений и историей освоения лесных ресурсов.

Созданные на основе статистического подхода карты уязвимости лесов Пермского края к ветровому воздействию и риска ветровалов в лесной зоне ЕТР отражают закономерности пространственного распределения как самих ветровалов, так и основных факторов, способствующих их возникновению.

Теоретическая значимость работы состоит в развитии подходов к оценке уязвимости лесов к ветровому воздействию и риска ветровалов. Эти подходы основаны на общедоступных источниках данных и могут быть масштабированы на другие регионы лесной зоны России.

Практическая значимость работы состоит в том, что полученные оценки риска ветровалов могут быть использованы для разработки стратегий адаптации лесного хозяйства к воздействию опасных природных явлений и изменению климата, а также при составлении региональных планов адаптации к изменению климата для субъектов РФ, расположенных в лесной зоне ЕТР. Результаты также могут использоваться крупными компаниями-лесопользователями, в целях и прогнозирования рисков, связанных с потерями лесных насаждений от ветровалов, и для планирования лесозаготовок.

Диссертационное исследование было выполнено при поддержке гранта Российского научного фонда № 24-27-20111 «Оценка и картографирование риска гибели лесов от ветровалов на основе спутниковых данных и продуктов их обработки (на примере Пермского края)». Результаты работы также внедрены в учебный процесс на кафедре картографии и геоинформатики ПГНИУ при преподавании нескольких дисциплин по дешифрированию спутниковых снимков. Созданные автором совместно с научным руководителем картографические базы данных «Ветровалы в лесной зоне Европейской территории России» и «Крупные пожары и ветровалы в лесах Республики Коми» опубликованы на картографических веб-сервисах «Смерчи в лесной зоне России» (https://tornado.gispsu.ru/) и «Геопортал Республики Коми» (https://geo.rkomi.ru/viewer/show/81). Обе базы данных актуализируется до настоящего времени.

Личный вклад автора заключается в сборе и обработке исходных данных, создании карты растительности Пермского края, расчете характеристик предикторов, используемых для оценки уязвимости и риска, обработке, анализе и интерпретации полученных результатов, создании карты уязвимости лесов Пермского края к ветровалам, в создании карты риска ветровалов на ЕТР, в написании научных статей в соавторстве, подготовке и представлении докладов на конференциях.

Апробация работы. Результаты исследования представлены на пяти научных конференциях Всероссийского и международного уровней:

– Всероссийская научная конференция «Цифровая география». 25 – 27 сентября 2024 г. Пермь ПГНИУ,

– Международная конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса», г. Москва, Институт космических исследований РАН, 2024 и 2025 гг,

– Всероссийская научная конференция молодых учёных «Экологическая безопасность в условиях антропогенной трансформации природной среды». 25–27 апреля 2025, г. Пермь, ПГНИУ,

– Международная конференция «ИнтерКарто. ИнтерГИС». 6–11 октября 2025, г. Кудымкар.

Публикации. Основные положения и результаты исследований изложены в пяти статьях в российских и зарубежных журналах, рекомендованных ВАК Минобрнауки РФ для представления материалов диссертационных работ, из них 4 статьи индексированы в международной базе цитирования Scopus, в том числе одна − в журналах первого квартиля (Q1). Также получено два свидетельства о государственной регистрации базы данных. Общее количество публикаций по теме диссертации – 7.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы из 128 наименований и 8 приложений. Объем работы составляет 135 страниц, включая 24 рисунка, 11 таблиц.

Благодарности. Автор выражает благодарность научному руководителю д.г.н., профессору А.Н. Шихову за поддержку на всех этапах работы. Также автор благодарит доцента кафедры картографии и геоинформатики ПГНИУ А.В. Тарасова и магистранта Е.А. Климину за помощь в разработке моделей машинного обучения.

ГЛАВА 1. ОЦЕНКА И КАРТОГРАФИРОВАНИЕ ЕСТЕСТВЕННЫХ НАРУШЕНИЙ ЛЕСНЫХ ЭКОСИСТЕМ: СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ИССЛЕДОВАНИЙ

1.1. Нарушения лесного покрова и вызывающие их факторы

Россия занимает особое, уникальное положение в мире по площади лесов. Более 49 % территории страны покрыто лесами, что составляет около 20% площади всех лесов планеты (Барталев и др. 2016). По данным Global Forest Watch (GFW) на территории России лесом покрыто более 770 млн га, площадь нарушений лесного покрова за период с 2001 по 2023 гг. составила 83,7 млн га (Global Forest Watch, URL: https://www.globalforestwatch.org). Сплошные рубки, лесные пожары, катастрофические ветровалы, вспышки размножения насекомых-вредителей и болезни – основные факторы нарушения лесов на территории России (Лескинен и др., 2020).

На мировом уровне факторы потери лесов принято классифицировать на обезлесение (Permanent deforestation) и деградацию (Forest degradation) (Curtis et al., 2018, Кархова и др., 2017). Обезлесение подразумевает полное уничтожение лесов без возможности восстановления. Обезлесение часто связано с переводом лесов в другой тип землепользования. Причиной обезлесения может быть урбанизация, добыча полезных ископаемых или сельское хозяйство (Curtis et al., 2018). Под деградацией понимается не только гибель лесов, но и ухудшение состояния лесной растительности, снижение запаса, видового разнообразия. При деградации лесного покрова характер землепользования не меняется и возможно лесовосстановление. К факторам, вызывающим деградацию лесов, относятся вырубки лесов, нарушения лесного покрова, вызванные природными факторами, например, лесные пожары, ветровалы (Кархова и др., 2017). Для территории России более характерны процессы деградации лесов, вызванные, прежде всего, вырубками и лесными пожарами. Обезлесение на территории России встречается редко (Кривогорницына, 2021).

Нарушения лесного покрова принято также классифицировать на природные и антропогенные. Основная часть антропогенных нарушений связана с лесопользованием. Лесохозяйственная деятельность на территории России регламентируется Лесным кодексом РФ. В соответствии с положениями Лесного кодекса, леса, расположенные на землях лесного фонда, подразделяются на три категории, которые определяют допустимые виды лесопользования. Эксплуатационные леса – леса, подлежащие освоению в целях заготовки древесины и других лесных ресурсов. Защитные леса выполняют защитные и регулирующие функции – средообразующие, водоохранные, оздоровительные и иные полезные функции. К защитным лесам относятся такие категории лесов как: леса, расположенные на особо охраняемых природных территориях, леса, расположенные в водоохранных зонах, городские леса и т.д. Освоение защитных лесов ограниченно целевым назначением лесов и выполняемыми ими функциями – в большинстве защитных лесов запрещены сплошные рубки, а для некоторых категорий ограничена интенсивность выборочных рубок. Резервные леса – леса, в которых в течении двадцати лет не планируется заготовка древесины, за исключением заготовки гражданами для собственных нужд (ЛК РФ).

Виды лесопользования в соответствии с Лесным кодексом в основном относятся к использованию ресурсов леса (древесина, недревесная продукция), инфраструктуры для разработки полезных ископаемых, рекреации и т.д. К связанным с лесохозяйственной деятельностью нарушениям лесного покрова относятся рубки главного пользования, рубки ухода за лесом, санитарные рубки и прочие рубки. Таким образом ежегодно площадь лесных вырубок составляет около 1,1 млн га (Открытые данные Рослесхоза). В 2024 году объем лесозаготовок составил более 194278 тыс м³. По объему заготовленной древесины лидирует Иркутская область 27540 тыс м³, а также Красноярский край и Вологодская область (18481 и 15157 тыс м³ соответственно). При этом по интенсивности лесозаготовки ($м^3$ в год с 1 га

лесных земель) лидирующие позиции занимают Костромская, Вологодская и Ивановская области (ЕМИСС, URL: https://fedstat.ru/).

Также к антропогенным факторам потери лесов относится гибель лесов в связи с несанкционированными свалками, загрязнением окружающей среды и незаконным захватом земель.

Нарушения лесного покрова природного характера могут быть вызваны абиотическими и биотическими факторами. Среди абиотических факторов большую роль играют лесные пожары и нарушения, вызванные воздействием неблагоприятных погодных условий – сильные ветра, шквалы и смерчи, а также засухи. Несмотря на общемировую тенденцию сокращения площадей лесных пожаров, за последние два десятилетия, на территории России наблюдается увеличение скорости распространения, частоты и тяжести лесных пожаров (Andela et al., 2017, Лескинен и др., 2020). Частота возникновения пожаров по стране неоднородна и выше в населенных районах Европейской территории России (ЕТР), Южной Сибири и Дальнего Востока. При этом площади лесных пожаров значительно выше в малонаселенных регионах (Коротков и др., 2022). По данным Global Forest Watch (GFW), полученным на основе спутниковых снимков Landsat, общая площадь потерь лесов от пожаров в период с 2001 по 2023 гг. составила около 58,2 млн га, что составляет около 70% от площади всех лесопотерь за указанный период (Tyukavina et al., 2022).

Гибель деревьев, подвергшихся воздействию огня, зависит от ряда факторов – тип пожара (верховой, низовой), интенсивность возгорания, породный состав, возраст, метеорологические условия и т.д. Также стоит отметить, что большинство возгораний на территории России вызваны антропогенными факторами. Доля антропогенных и природных причин возникновения пожаров варьируется в разные годы и для разной территории. Например, для ЕТР доля антропогенных факторов выше и составляет около 93,5 %, чем на территории азиатской части, где на антропогенные факторы приходится около 77 % пожаров (Лескинен и др., 2020). По спутниковым

данным за период с 2001 по 2016 гг. в среднем за год на территории России наблюдается около 15 тысяч лесных пожаров (Лупян и др., 2017). Площадь лесов, подвергшихся воздействию огня, ежегодно варьируется от 2 до 11 млн. га, в среднем составляет около 5,6 млн. га в год (Коротков и др., 2022).

Среди природных факторов нарушения лесов также выделяют ветровалы, вызванные сильными ветрами, шквалами и смерчами. Общая площадь ветровалов на Европейской территории России (ЕТР) с 1986 по 2020 гг. составляет 3160,5 км^2 (Шихов и др., 2023). Ежегодная площадь повреждения лесов составила от 300 до 27 000 га, за исключением максимальной площади повреждения, зафиксированной в 2010 году, которая составила около 128 000 га (Лескинен и др., 2020). К важным характеристикам ветровалов относят степень повреждения или доля погибших деревьев, периодичность. На основе данных характеристик принято выделять эндемичные и катастрофические ветровалы. К эндемичным относятся ветровалы, происходящие регулярно и приводящие к повреждению отдельных деревьев вследствие воздействия ветров, характерных для данной местности. Ветровалы, оказывающие разрушительное воздействие на большие участки леса, приводящие к значительному нарушению экосистем и характеризующиеся редкой повторяемостью, относят к катастрофическим (Siedl et al., 2011; Mitchell et al., 2013).

К биотическим факторам нарушений лесного покрова относятся вспышки массового размножения насекомых-вредителей и очаги развития болезней, которые приводят к гибели древостоя. Крупные вспышки массового размножения насекомых приводят к гибели десятков миллионов гектар леса и случаются периодично. В связи с климатическими особенностями эти вспышки чаще всего фиксируются южнее 60˚ с.ш., что может измениться в связи с потеплением климата (Лескинен и др., 2020). По данным спутниковых наблюдений общая площадь лесов, погибших вследствие вспышек массового размножения насекомых, за период с 2003 по 2017 гг.

составила около 5,54 млн га (Коротков и др., 2022), что многократно превышает потери лесов от ветровалов.

Воздействие различных факторов нарушения варьируется от года к году – некоторые факторы оказывают значительное влияние на лесные экосистемы. По данным государственной статистики за 2014-2017 гг. около 67% площади погибших лесов приходятся на лесные пожары, 13% вызваны вспышками размножения насекомых-вредителей, 10% приходятся на воздействие неблагоприятных погодных условий, 9% вызваны болезнями и около 1% приходится на иные факторы (Росстат, 2018). На основе анализа спутниковых снимков Landsat за период 2002 – 2011 гг. было показано, что 65,5% нарушений лесов России приходится на лесные пожары, около 30% на лесозаготовку и 5% на иные факторы, включающие в себя биотические факторы, ветровалы. По данным GFW за период 2001 – 2024 гг. причиной 70% нарушений лесного покрова являются лесные пожары (Global Forest Watch, URL: https://www.globalforestwatch.org). Несмотря на различия в статистических данных, эти показатели отражают соотношение факторов нарушения лесного покрова. Стоит отметить, что разные факторы нарушения лесов часто взаимосвязаны. Например, засуха является благоприятным фактором для массового размножения насекомых-вредителей, а также является фактором повышения рисков возникновения лесных пожаров (Лескинен и др., 2020).

1.2. Современные подходы к оценке и картографированию уязвимости лесов к воздействию ветра.

Согласно рекомендациям Международной группы экспертов по изменению климата (IPCC, 2022), оценка климатически-обусловленных рисков предполагает расчет трех составляющих: опасности, подверженности и уязвимости. Применяя эти составляющие к ветровалам, в качестве опасности рассматривают повторяемость и интенсивность сильных ветров, шквалов и смерчей, вызывающих ветровалы. Подверженность – это присутствие или распространенность объекта, который может подвергаться негативному воздействию (в данном случае лесов); а уязвимость – совокупность характеристик лесов и условий их произрастания, которые определяют предрасположенность к воздействию ветра.

1.2.1. Оценка повторяемости экстремальных метеорологических явлений

Повторяемость ветров экстремальной силы отражает долю дней со значениями скорости ветра искомой величины. Для оценки повторяемости экстремальных ветров используют показатель максимума скорости ветров различной повторяемости (от года до 10 и более) (Laapas et al., 2019). Получить данные о скорости ветра можно с помощью различных методов.

Так, долгое время основным источником данных о скорости ветра были наземные сети метеорологических станций. Но порой проблематично определить повторяемость сильных ветров по данным метеостанций в связи с низкой плотностью сети (Hofherr et al., 2010). Территория России характеризуется низкой плотностью метеорологических станций. Среднее расстояние между станциями на ЕТР составляет 53,7 км, а на севере Сибири – свыше 100 км (Шихов и др., 2023).

Данные метеостанций бывают недостаточно надежными в связи с ветровой тенью, образованной строениями или растущими рядом деревьями. Это может привести к снижению точности оценки повторяемости сильных ветров. Также метеостанции часто располагают на пониженных участках

местности, что не позволяет оценивать локальные изменения скорости ветра, связанные с особенностями рельефа местности. В свою очередь насаждения, произрастающие на наветренных склонах, более подвержены воздействию сильных ветров и поэтому вызывают больший интерес (Laapas et al., 2019).

Чтобы преодолеть ограничения применения наземных наблюдений используют данные реанализа, которые представляют результат математического моделирования поля скорости ветра на основе глобальных моделей атмосферы (Venäläinen et al., 2017). Данные реанализа представляют собой продукт ассимиляции исторических атмосферных наблюдений (наземных, спутниковых и пр.) за длительный период в численной модели динамики атмосферы (Baatz et al., 2021). К ключевым характеристикам реанализов относится пространственное разрешение, временной охват и шаг, а также схема усвоения данных. Среди глобальных реанализов в оценке повторяемости сильных ветров широко применяются продукты Европейского центра среднесрочных прогнозов (ECMWF) ERA-Interim, ERA40 и ERA5 (Venäläinen et al., 2017, Laapas et al., 2019, Della-Marta et al., 2009, Hofherr, Kunz., 2010). Наиболее высокодетальными являются реанализы ERA5 и ERA5-Land (шаг сетки 0,25° и 0,1° соответственно), с шагом по времени 1 ч. Данные этих реанализов доступны за период с 1940 г. по настоящее время. Данные о скорости ветра в них представлены на высоте 10 и 100 м над уровнем поверхности, с 1950 г. по настоящее время (Gualtieri, 2022).

К преимуществам реанализов относится однородность пространственного и временного разрешения множества переменных на протяжении нескольких десятилетий. Исследования показывают высокую согласованность данных реанализа с данными наземных наблюдений (Lindsay et al., 2014). Поскольку данные реанализа представляют собой осредненное по сетке значение, максимальная скорость ветра по реанализу ниже, чем по наблюдениям на метеостанциях (Venäläinen et al., 2020).

Влияние локальных особенностей рельефа и характера землепользования на максимальную скорость ветра не может быть оценено в масштабе данных реанализа. По этой причине анализ повторяемости сильных ветров требует учета орографических параметров. Для решения данной задачи используют цифровую модель рельефа (ЦМР) и производные переменные, такие как уклон, экспозиция, кривизна, выпуклость, индекс наветренного и подветренного склона. Данный метод позволяет значительно улучшить оценку повторяемости сильных ветров на локальном уровне. (Laapas et al., 2019, Venäläinen et al., 2017).

Оценка повторяемости на основе значений скорости ветра, полученных из наблюдений или из реанализа, корректна для случаев сильных ветров, связанных с процессами синоптического масштаба, которые явно воспроизводятся реанализом. Однако данные реанализа не воспроизводят характеристики сильных ветров, вызвавших смерчи и шквалы по причине локального характера явления (Шихов и др., 2023). Для оценки таких явлений используют параметры, характеризующие не сами опасные явления, а условия в атмосфере благоприятные для их возникновения (Rasmussen, Blanchard, 1998; Brooks et al., 2018).

Известно более 50 параметров, которые характеризуют условия формирования сильных конвективных штормов (Grieser, 2012). К ним относится конвективная неустойчивость, влагосодержание воздушной массы, сдвиг ветра по скорости и направлению, завихренность и другие. Эти параметры в большинстве современных работ рассчитываются по данным реанализа. В частности, для территории Северной Евразии на основе реанализа ERA5 создана база данных конвективных параметров атмосферы (более 50 различных параметров) с шагом по времени 1 ч и с размером ячейки 0,25° (Чернокульский и др., 2022), на основе которой рассчитываются в том числе климатические характеристики этих параметров, такие как среднее значение за летний период или повторяемость экстремально высоких значений. Их пространственное распределение в основном хорошо

согласуется с известным распределением шквалов и смерчей, а также ветровалов (Shikhov et al., 2025).

Для оценки повторяемость сильных ветров также используется плотность молниевых разрядов. В работе (Shikhov et al., 2025) применялись данные World Global Lightning Climatology (WGLC), полученные на основе сети грозопеленгации WWLLN за период с 2010 по 2020 гг. Исследование показывает статистически значимую корреляцию плотности молниевых разрядов с пространственным распределением ветровалов. В настоящей работе эти же данные используются как один из предикторов при оценке риска ветровалов.

1.2.2. Оценка уязвимости древостоев

Уязвимость лесов к воздействию сильных ветров определяется параметрами насаждения, характеристиками местоположения и характером лесопользования (Шихов и др., 2023). Среди характеристик древостоя, влияющих на устойчивость к воздействию сильных ветров, выделяют породный состав, возраст древостоя, высота и диаметр ствола, свойства кроны и структура корневой системы, а также полнота древостоя (Peltola et al., 1999; Dobbertin, 2002; Seidl et al., 2011; Hanewinkel et al., 2014). К факторам местоположения относятся климатические, орографические (высота над уровнем моря, крутизна склона), почвенно-гидрологические (механический состав почвы, содержание влаги в почве, глубина залегания грунтовых вод и т.д.) (Dobbertin, 2002; Schindler et al., 2012). Характер лесопользования влияет на уязвимость лесов за счет появления новых открытых пространств внутри насаждения. Деревья на границе появившегося открытого пространства не адаптированы к более сильным ветрам, за счет чего растет вероятность слома или вывала древостоя (Peltola et al., 1999).

Существует два основных подхода к оценке уязвимости лесов к воздействию ветра – статистический и механистический. Статистический подход основан на получении зависимостей вероятности возникновения

ветровала от независимых переменных. В рамках него применяются логистическая регрессия и методы машинного обучения. В качестве предикторов используются характеристики местоположения, характеристики древостоя, характеристики отдельных деревьев, а также их комбинации. Такие модели применяются для насаждений со сложной структурой, породным составом, а также для территорий с разнообразным рельефом и разными типами почв (Krejci et al., 2018, Seidl et al., 2011).

Статистический подход позволяет получать оценку уязвимости с точностью прогнозирования на уровне 70 – 75% (Siedl et al., 2011). Например, (Kramer et al., 2001) удалось получить 72% точность определения уязвимости лесов к ветровалам на основе 4 абиотических факторов – уклон, высота над уровнем моря, тип почвы и повторяемость сильных ветров. В качестве исходных данных в работе использовалась цифровая карта лесных угодий. Более подробная информация о структуре и возрасте лесных насаждений были собраны с помощью полевого метода. Данные о высоте и уклоне поверхности получены на основе ЦМР. Информация о распределении скоростей ветра получена с помощью модели EXPOS, которая имитирует линейный поток воздуха над местностью с заданным направлением.

В работе (Hanewinkel et al., 2005) в качестве исходных данных о характеристиках насаждения использовались данные инвентаризации лесов о породном составе, возрастной структуре, высоте и запасе древостоя, а также параметры рельефа на основе ЦМР.

Уязвимость лесов к воздействию ветра зависит от характеристик древостоя, местоположения, а также от характера землепользования. Вероятность повреждения древостоя ветром увеличивается с высотой дерева, а также некоторые породы деревьев, например, ель европейская, более уязвимы к воздействию ветра (Dobbertin, 2002; Peltola et al., 1999). Важную роль играет характер лесного хозяйства: деревья, выросшие в глубине насаждения и защищенные от воздействия ветра, наиболее чувствительны к воздействию ветра после проведения сплошных или выборочных рубок

(Peltola et al., 1999; Suvanto et al., 2016). К значимым факторам также относится тип почвенного покрова (Kramer et al., 2001).

Для повышения точности данных методов применяют данные высокого пространственного разрешения. Результаты исследования (Albrecht et al., 2019) демонстрируют высокую точность оценки уязвимости лесов к сильным ветрам, как при использовании в качестве предиктора данных о скорости ветра, так и при использовании в качестве переменных данных о рельефе и характеристиках древостоя. Также для повышения точности результатов используют характеристики древостоев, полученные путем воздушного лазерного сканирования (Saarinen et al., 2016).

Для создания моделей оценки уязвимости с применением логистической регрессии требуется большой объем информации о территории исследования, что влечет за собой высокие требования к объему и точности входных данных. При неполном объеме или недостаточном качестве данных понижается точность таких моделей.

В последние годы все большее применение в рамках статистического подхода находят методы машинного обучения – искусственные нейронные сети, Random Forest и другие (Albrecht et al., 2019; Hart et al., 2019). Данные методы позволяют проводить оценку уязвимости на основе ограниченного объема данных, исключая некоторые факторы из анализа. Например, исследование (Hanewinkel et al., 2005) показало, что результаты применения искусственных нейронных сетей для оценки уязвимости превосходят по точности результаты, полученные с применением логистической регрессии. Также они позволяют получать достаточно высокий уровень точности при исключении из анализа некоторых переменных. В свою очередь, результаты (Hart et al., 2019) свидетельствуют о значительном преимуществе метода Random Forest над другими методами статистического подхода. Применение метода Random Forest позволяет получить более надежные прогнозы даже при исключении из анализа некоторых переменных параметров.

Механистические модели оценки подверженности устанавливают связи между скоростью ветра, характеристиками деревьев и вероятностью повреждения от воздействия сильных ветров. Они количественно оценивают подверженность каждого отдельного дерева. Данные модели рассчитывают подверженность в два этапа. Первый этап включает в себя определение критической скорости ветра, при которой происходит падение деревьев. На втором этапе проводится оценка повторяемости ветров критической скорости на территории исследования (Peltola et al., 1999, Gardiner et al., 2008).

Критическая скорость ветра зависит от ряда факторов – характеристик деревьев и местности. Для определения критической скорости ветра используют факторы положения дерева в насаждении, расположения дерева с подветренной стороны, тип почвы, влажность почвы, характеристики кроны дерева, характеристики ствола, морфологию корневой системы. При моделировании также учитывается изменение данных характеристик в пространстве, во времени и для разных пород деревьев (Gardiner et al., 2008).

Второй этап включает в себя определение вероятности превышения критической скорости ветра и основывается на анализе повторяемости сильных ветров на территории исследования. При наличии точных данных с метеостанций они применяются напрямую при создании механистической модели. Если такие данные отсутствуют, применятся различные методы прогнозирования. Одним из методов прогнозирования повторяемости сильных ветров служит модель WAsP (Mortensen et al., 2005), в которой скорость ветра между метеостанциями оценивается с использованием модели воздушного потока с учетом особенностей местности.

Наиболее распространенными механистическими моделями являются модель GALES (Gardiner et al., 2000) и HWIND (Peltola et al., 1999). Главным отличием данных моделей является то, что модель GALES была разработана для расчета критической скорости ветра в глубине насаждений, а модель HWIND для одиноко стоящих деревьев или деревьев, расположенных на краю насаждения.

Модель GALES рассчитывает пороговые скорости ветра, при которых происходит слом или опрокидывание дерева, в зависимости от породы и высоты дерева, диаметра ствола, расстояния между деревьями, типа почвы. Несмотря на то, что модель была разработана для расчета критической скорости в глубине насаждения, она может применяться для расчета риска на любом расстоянии от открытого пространства. На краю насаждения риск считается постоянным в связи с адаптацией деревьев к воздействию сильных ветров. Ветровая нагрузка на дерево оценивается на основе воздействия ветра на крону, исходя из предположения, что она распределена равномерно между деревьями (Gardiner et al., 2008).

Модель GALES была создана для определения вероятности превышения критической скорости ветра для монокультурных хвойных древостоев одинакового возраста. Она наиболее адаптирована для ели ситхинской, ели обыкновенной и сосны обыкновенной. Несмотря на это, данная модель была адаптирована для других типов лесов (Mikklesen, 2007). При исследовании смешанных насаждений моделирование необходимо проводить для каждого вида по очереди (Gardiner et al., 2008).

Модель HWIND позволяет определить критическую скорость ветра для одиноко растущих деревьев и деревьев, растущих на границе насаждения. В данной модели силы, оказывающие воздействие на дерево, разделяются на горизонтальные, вызванные ветром и вертикальные, обусловленные силой тяжести, включающие вес ствола, кроны дерева и вес снега. Горизонтальные воздействие определяется суммой сил, действующих на каждую точку ствола и кроны. Для вычисления вертикальных сил, воздействующих на дерево, используют вертикальное распределение масс ствола и кроны дерева (Gardiner et al., 2000). HWIND изначально была разработана для определения критической скорости ветра на границе древостоя, но ее также можно использовать на любом расстоянии от края насаждения. Исходными данными для модели являются порода дерева и его высота, плотность деревьев в насаждении, удаленность от края насаждения. При моделировании обычно

используют средние характеристики древостоя, но при изучении смешанных лесов, моделирование проводится для каждого вида деревьев отдельно, предполагая, что плотность древостоя остается одинаковой, независимо от доли деревьев каждого вида в насаждении (Gardiner et al., 2008).

1.2.3 Оценка риска и ущерба

Риск возникновения ветровала оценивается как совокупность опасности, подверженности и уязвимости. Опасность определяется как вероятность ветрового воздействия, которое приведет к слому или вывалу древостоя (Schelhaas et al., 2010). Для определения опасности сначала оценивается критическая скорость ветра, которая необходима для повреждения деревьев ветром, а затем оценивается вероятность ветрового поражения деревьев. Подверженность определяется объемом и стоимостью насаждений, которые могут быть повреждены (Schelhaas et al., 2010). Уязвимость определяются устойчивостью лесов к воздействию сильных ветров.

Выделяют три подхода к оценке и прогнозированию ущерба от сильных ветров: эмпирический, статистический и механистический. Эмпирические методы основаны на полевых наблюдениях. Такие методы оценки ущерба основаны на анализе факторов риска на основе больших полевых выборок. Например, оценить вероятность ущерба можно путем оценки поврежденных участков. Такой метод позволяет определить масштабы ущерба, но не позволяет более детально оценить ущерб от ветра и не обеспечивает статистическую достоверность (Kamimura, 2007).

Статистические методы прогнозирования ущерба основаны на исторической информации об ущербе от ветра и на данных о подверженности и уязвимости лесов к воздействию сильных ветров. Они определяют вероятность ущерба, объединяя компоненты уязвимости и риска. Это позволяет учесть зависимость степени повреждения от факторов уязвимости древостоя (Lecina-Diaz et al., 2020). Данная группа методов применяется для долгосрочного прогнозирования ущерба (Kamimura, 2007).

Механистический метод оценки риска объединяет механистическую модель оценки риска ветровалов и модель воздушного потока (Kamimura, 2007). Например, в работе (Zeng et al., 2007) для оценки ущерба используются модели риска ущерба HWIND и модели роста лесов (SIMA). Комбинация этих данных позволяет получить вероятность и прогнозируемый объем ущерба. Полученная модель позволяет получать как краткосрочные прогнозы, так и долгосрочные риски ущерба, возникающие в связи с динамикой роста леса и управлением лесными ресурсами.

Наибольший ущерб отмечается в случаях, когда леса подвергаются воздействию порывов ветра скорость которых превышает 35 м/с (Valta et al., 2019). В данной работе был сопоставлен объем зарегистрированного ущерба лесам (в кубометрах древесины) с максимальными порывами ветра, наблюдавшимися на территории Финляндии за последние 10 лет. Ущерб лучше всего коррелирует с пиковой скоростью ветра. Так же для оценки ущерба используются данные о направлении ветра, полученные с метеостанций и характеристики почвенного покрова. Таким образом, на основе оценки входных параметров для шести случаев штормов в Финляндии удалось выявить зависимость ущерба от максимальной скорости порывов ветра. На основе полученных результатов зная скорость порывов ветра можно оценить предположительный ущерб лесам.

1.3. Исследования ветровалов в России

На территории России в течение десятилетий исследования ветровалов в основном фокусировались на факторах, определяющих устойчивость деревьев к ветровому воздействию, и проводились на относительно ограниченных территориях, в частности в Центрально-Лесном заповеднике, на Среднем Урале и в некоторых других регионах. Одной из наиболее значимых работ является монография (Скворцова и др., 1983), в которой были выделены пять групп факторов влияющих на устойчивость деревьев к ветровому воздействию: орографические, климатические, почвенно-

гидрологические, биологические и хозяйственные факторы. Среди орографических факторов выделены высота над уровнем моря, крутизна склонов и расположение горных систем вдоль преобладающего направления ветров. Среди климатических факторов главным фактором является ветер. Сильные ветра являются главной причиной, вызывающей ветровалы и буреломы. Постоянные раскачивания деревьев под воздействием ветра приводит к ухудшению связи корней с почвой. К снижению устойчивости древостоев приводят сильные засухи и морозы, обилие осадков в виде дождя и мокрого снега. Среди почвенно-гидрологических факторов как наиболее важные оценены переувлажненность почв, мощность почвенного профиля, близость залегания горизонта вымывания, наличие сезонной мерзлотности в почве. Данные факторы приводят к деформации корневой системы. К биологическим факторам отнесены характеристики древостоев: возраст, породный состав, полнота насаждений. Среди хозяйственных факторов выделено наличие свежих вырубок. Также была отмечена роль совместного влияния этих факторов

Многие исследования проведены по отдельным ветровалам с применением полевых методов или по данным лесоустройства. Оценка зависимости площади ветровала от факторов, определяющих уязвимость лесов, дана в работе (Петухов, 2016). Исследования на территории Костромской области показали, что менее устойчивы к воздействию сильных ветров леса с преобладанием ели, насаждения возрастом более 40 лет и более 16 м высотой. Статистически значимой корреляции с такими показателями как полнота, бонитет и тип леса не выявлено.

В исследовании (Алесенков и др., 2006) были описаны крупные ветровалы на территории заповедников Висимский, Вишерский и Печоро-Илычский в Свердловской области, Пермском крае и республике Коми. Во всех случаях наиболее подвержены воздействию сильного ветра оказались перестойные и спелые еловые и сосновые леса. При этом смешанные средневозрастные леса и молодняки подверглись нарушению гораздо

меньше. Также авторы подчеркивают влияние орографических факторов, влажности почвы, уровня грунтовых води и лесохозяйственной деятельности. В работе (Ulanova et al.,2000) показано, что при воздействии ветра скоростью более 20 м/с наибольшие повреждения наблюдаются в осиновых, еловых и березовых лесах. Также отмечено, что в спелых и перестойных лесах повреждения более значительные, чем в молодняках.

Оценка повторяемости сильных ветров была проведена в работе (Lassig, Mocalov, 2000). Исследование проводилось на территории 4 субъектов РФ – Республика Башкортостан, Свердловская и Челябинская область, Пермский край. Оценивалась повторяемость ветров со средней скоростью выше 20 м/с по данным метеостанций. Также в работе оценено пространственное распределение ветровалов в зависимости от таксационных характеристик.

Массовые ветровалы оказывают большое влияние на почвенный покров. При падении крупные деревья вырывают обширные участки почвы. Также на характеристики почв оказывает влияние сам валеж. В исследованиях (Ханина и др., 2022, Ханина и др., 2024) выявлены изменения свойств почв в связи с массовым ветровалом. Выявлена связь степени изменения почвенных характеристик с видом упавшего дерева.

В последнее время данные дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) все чаще находят применение в исследованиях ветровалов. Для определения контуров ветровалов применяются открытые данные среднего пространственного разрешения, например, данные Landsat, а также данные более высокого разрешения RapidEye, GeoEye, WorldView (Крылов, Владимирова, 2011). В работе (Крылов и др, 2012) на основе спутниковых снимков Landsat определены контуры ветровалов, произошедших на европейской территории России в 2009-2010 гг. Выделение контуров производилось с применением методов визуального дешифрирования, а также автоматизированного дешифрирования: пороговая классификация вегетационного индексов SWVI и NDVI, дискриминантный анализ и

классификация с обучением методом опорных векторов и методом дерева решений. Автоматизированные методы выделения контуров ветровалов показали схожий уровень точности, при этом выделение контуров по данным индекса SWVI менее трудозатратно и дает более стабильные результаты. Точность выделения контуров ветровалов повышается за счет создания маски лесопокрытой территории (Крылов, Владимирова, 2011).

В настоящее время для выделения ветровалов спутниковым снимкам применяются технологии искусственного интеллекта. В исследовании (Kislov, Korznikov, 2020) использовали сверточные нейронные сети (CNN) для выделения контуров ветровалов по данным спутников сверхвысокого разрешения. Применение нейронных сетей позволило достичь 94% точности выделения контуров ветровалов. Также специалисты компании АО «Терра Тех» (ТерраТех, 2024) реализовали автоматизическое картографирование ветровалов по всей России в период 2023 – первая половина 2024 гг. В результате была построена карта, которая включает 1421 случай ветровала.

Тематические продукты обработки спутниковых данных также применяются при выделении участков гибели древостоя от ветровала. В работе (Korznikov et al., 2019) на основе данных Global Forest Watch о сокращении лесной площади выделены контуры ветровалов, произошедших в 2015 году на территории Сахалина и Южных Курил. Также проведена оценка зависимости пространственного распределения ветровалов и топографических факторов, которая подчеркнула увеличение площади нарушений на наветренных склонах.

Спутниковые данные и тематические продукты использованы для создания базы данных о ветровалах в работе (Шихов и др., 2023). Идентификация и выделение контуров ветровалов проведено с использованием данных Landsat и тематических продуктов Global Forest Change и Eastern’Europe Forest Cover Change. Для определения дат и характеристик штормовых событий, приведших к ветровалам, использовались архивные данные метеорологических станций, ежемесячные

обзоры журнала «Метеорология и гидрология», а также база данных ESWD (European Severe Weather Database). База данных о ветровалах включается себя данные о ветровалах в Европейской территории России за период с 1986 по 2024 гг., а в Сибири с 2001 по 2024 гг. Данные опубликованы в открытом доступе на сервисе (Смерчи в лесной зоне России, 2025).

Созданная база данных может использоваться в исследованиях по оценке риска и уязвимости лесов к ветровому воздействию. Например, полученные результаты использованы в работе (Шихов, Дремин, 2021). Оценка уязвимости лесов к ветровому воздействию проведена с использованием данных о породном составе древостоя, полученных путем классификации спутниковых снимков, морфометрических характеристики местности, а также соседства со свежими вырубками. Исследование включает 10 крупных ветровалов, произошедших в разных лесорастительных условиях. Были выявлены зависимости доли площади ветровала от преобладающих лесообразующих пород, ориентации склонов по отношению к ветру, а также близости к свежим вырубкам.

1.4. Выводы по главе 1

Изучению факторов, определяющих уязвимость лесов к ветровалам, оценке и моделированию уязвимости лесов к ветровалам и расчетам риска ветровалов посвящено множество публикаций во многих странах мира. Наиболее актуальна данная тематика для стран Северной, Центральной Европы, Канады и США, где наблюдается наибольший ущерб от ветровалов.

При оценке уязвимости рассматривают три группы факторов – характеристики насаждений, факторы местоположения и практика лесопользования. Среди первых наиболее значимы породный состав, высота деревьев, возраст (включая распределение деревьев по возрасту в насаждении), особенности крон и корневой системы, полнота древостоя. Установлено, что ключевыми факторами местоположения являются рельеф, мощность почвенного профиля, механический состав и влажность почвы,

близость открытых пространств и водоемов. Факторами, повышающими уязвимость, являются наветренные склоны, маломощные каменистые почвы и их высокая влажность. Характер лесопользования существенно влияет на уязвимость лесов к ветровалам на локальном уровне, за счет появления новых открытых пространств внутри лесного массива при сплошных рубках или прореживания древостоя при выборочных рубках.

Количественная оценка перечисленных факторов является основой моделирования уязвимости и оценки риска ветровалов. Для практической реализации существующих методов расчета риска ветровалов необходимы детальные пространственные данные о характеристиках насаждений и условиях их произрастания. Для территории России их получение часто является существенной проблемой.

Ранее опубликованные исследования ветровалов на территории России были направлены на выявление факторов, определяющих уязвимость лесов к ветровалам, на основе локальных полевых наблюдений или спутниковых данных. Картографирование уязвимости лесов выполнялось на основе ограниченного набора данных низкого пространственного разрешения.

Оценки рисков используются при разработке планов устойчивого лесопользования и адаптации лесного хозяйства к изменению климата. Однако в России такие исследования почти не проводились, по причине того, что лишь недавно были опубликованы необходимые для этого многолетние и репрезентативные данные о ветровалах. Также для расчетов риска ветровалов необходимы детальные данные о характеристиках насаждений и условиях их произрастания, получение которых является существенной проблемой. В связи с этим, закономерности повреждения лесов ветровалами остаются малоизученными. Однако в последние годы появление новых тематических продуктов обработки спутниковых данных (включая данные о высоте лесного полога, цифровые модели рельефа и др.) позволяет подойти к решению задачи на качественно новом уровне.

ГЛАВА 2. КАРТОГРАФИРОВАНИЕ УЯЗВИМОСТИ ЛЕСОВ К ВЕТРОВОМУ ВОЗДЕЙСТВИЮ НА ОСНОВЕ СПУТНИКОВЫХ ДАННЫХ (НА ПРИМЕРЕ ПЕРМСКОГО КРАЯ)

2.2. Создание карты растительности Пермского края

Породный состав является ключевой характеристикой насаждений, определяющих уязвимость к воздействию ветра. Для оценки уязвимости лесов к ветровалам на региональном уровне требуется высокая тематическая детальность и пространственное разрешение данных о породном составе. Материалы лесоустройства являются основным источником высокодетальных данных о характеристиках насаждений, но имеют гриф «для служебного пользования». Также данные лесоустройства характеризуются временной неоднородностью, что связано с проведением лесоустройства в разных лесничествах Пермского края в разное время.

Стремительное совершенствование технических возможностей современных спутниковых систем ДЗЗ послужили основанием для развития спутникового картографирования растительности. Для территории России спутниковые карты растительного покрова созданы Институтом космических исследований РАН. В частности, в рамках проекта GLC2000 по данным SPOT-Vegetation была создана карта наземных экосистем Северной Евразии, легенда которой включает 27 тематических классов (Bartalev et al., 2003). В последующие годы в ИКИ РАН был разработан алгоритм локально-адаптивной классификации LAGMA (Bartalev et al., 2014), с применением которого создаются ежегодно обновляемые карты растительности России с пространственным разрешением 230 м (Барталев и др., 2016). Помимо них на основе многолетнего ряда спутниковых данных MODIS ежегодно обновляются карты используемых пахотных земель, преобладающих пород леса и запасов стволовой древесины в лесах с аналогичным пространственным разрешением (Барталев и др., 2016). Несмотря на разнообразие существующих продуктов, содержащих информацию о

растительном покрове, ни один из них не соответствует требованиям к пространственному разрешению и тематической детальности, которые необходимы для анализа уязвимости лесов к ветровалам на региональном масштабе. В связи с этим для оценки уязвимости лесов Пермского края к ветровому воздействию создана новая карта растительности.

В качестве исходных данных для создания карты растительности использовались снимки со спутника Landsat-8, полученные сенсором Operational Land Imager (OLI). Основными критериями их выбора являются пространственное разрешение, наличие необходимых спектральных каналов, ширина полосы обзора и доступность данных. Снимки Landsat-8 имеют пространственное разрешение 30 м в спектральных каналах видимого, ближнего и среднего инфракрасного (ИК) диапазона, которые имеют ключевое значение для анализа растительного покрова. Ширина полосы обзора спутника Landsat составляет 185 км, что идеально подходит для решения задач регионального картографирования. Данные Landsat получены с веб-сервиса (USGS EarthExplorer).

Площадь Пермского края составляет 160,2 тыс. км^2. Пермский край отличается высокой степенью лесистости - 71,3% территории края покрыто лесной растительностью (Лесной план Пермского края на 2018-2027 годы, 2025). Леса по территории края распространены неравномерно и лесистость на севере и юге края сильно отличается. В северных, северо-восточных районах и на Среднем Урале лесистость достигает 90%. При этом в южных районах края лесистость может снижаться до 30-35%. На территории края преобладают хвойные насаждения: на долю хвойных лесов приходится 61%, на долю мягколиственных пород – 39%. Преобладание хвойных пород характерно для северных, центральных и восточных лесничеств Пермского края, а на юге края преобладание мягколиственных пород. Среди хвойных пород широко распространены еловые (77,3%) и сосновые (21,4%) насаждения. К преобладающим мягколиственным породам относится береза и осина.

Работы по созданию карты растительности проводились в 2021 г. (Шихов, Семакина, 2022). Для территории Пермского края было создано безоблачное покрытие снимками Landsat, полученными в летний период (всего 16 сцен). Покрытие состоит из снимков за 2016−2020 гг., большинство из них были получены в июле, другие − в конце июня или в начале августа. Такой выбор обоснован минимальной облачностью в эти даты, а также невозможностью использования более ранних снимков, например, за май, когда в горной части края еще не начался вегетационный период. Обработка каждого снимка осуществлялась отдельно с последующей сшивкой результатов в единое покрытие.

Классификация изображений выполнена на основе комбинации среднего ИК, ближнего ИК и зеленого спектральных каналов, имеющих номера 7, 5 и 3. Выбор этих спектральных каналов обусловлен тем, что максимум отражательной способности растительности достигается в ближнем ИК диапазоне спектра, а средний ИК, в свою очередь, чувствителен к содержанию воды в листьях и хвое (Барталев и др., 2016). По изображению в данной комбинации каналов выделяются особенности древостоев различного породного состава. В частности, темно-зеленый цвет лесных массивов является индикатором увеличения доли темнохвойных пород. Для сосновых лесов характерны темно-фиолетовый или серо-фиолетовый цвета, а для лиственных лесов – зеленый. Луговая растительность выделяется ярко-зеленым цветом. Ярко-розовый цвет характерен для участков открытой почвы, гари будут выделяться ярко красным цветом, а городская застройка − розово-фиолетовым (Интерпретация комбинаций каналов данных Landsat, URL: https://gislab.info/qa/landsat-bandcomb.html).

Для классификации снимков в настоящей работе использовался метод максимального правдоподобия, который относится к группе классификаторов с обучением (Балдина, Лабутина, 2021). Отличительной особенностью реализации данного метода в пакете ESRI ArcGIS является высокая скорость вычислений, что имело значение при обработке

значительного объема данных. В результате классификации каждый пиксел изображения был отнесен к тому классу, к которому он может принадлежать с наибольшей вероятностью.

Первым шагом при классификации является определение тематических классов (предварительной легенды формируемой карты). Тематические классы должны отражать характерные для данной территории объекты местности. В качестве основы для построения легенды использовались данные карты растительности России с размером пиксела 230 м (Барталев и др., 2016). Для территории Пермского края были определены 14 тематических классов, включая 6 классов лесной растительности и 8 классов, которые соответствуют нелесным территориям (табл. 2.1). Обучающая выборка формировалась с учетом данных карты растительности России (Барталев и др., 2016), а также известных дешифровочных признаков основных типов растительного покрова, включая леса различного породного состава (Шихов и др., 2020). Классификация каждого снимка проводилась отдельно. В результате классификации были получены 16 растров (с пространственным разрешением 30 м) в 40-й зоне проекции UTM на эллипсоиде WGS-1984.

Таблица 2.1. Состав легенды карты растительности

Выделенные в результате классификации		Выделенные в результате постобработки
леса	нелесопокрытые земли	
темнохвойные, сосновые, смешанные с преобладанием темнохвойных пород, смешанные, смешанные с преобладанием лиственных пород, лиственные	Открытый грунт и каменные россыпи, горная тундра, водная поверхность, сельскохозяйственные поля, луга, населенные пункты, болота	Населенные пункты, вырубки, зарастающие лиственным, смешанным и хвойным лесом; участки восстановления на бывших сельхозугодьях (с преобладанием лиственных и хвойных пород), вырубки, гари и ветровалы

Постобработка представляет собой совокупность операций по обработке классифицированного изображения (схемы автоматизированного

дешифрирования) для создания итоговой тематической карты (Балдина, Лабутина, 2021). Она включает переклассификацию для выделения тех классов, которые сложно выделить по автоматизированной классификации изображения (например, населенных пунктов), слияние классов, сглаживание изображения для перехода от классифицированных пикселов к тематическим контурам. Для постобработки часто используются дополнительные данные (априорно известная информация об объектах на территории), если их пространственное разрешение близко к таковому для исходных снимков.

В данном случае постобработка включала несколько этапов. Первым этапом были выделение нарушений лесного покрова и их классификация на вырубки, гари и ветровалы. Для этого использованы тематические продукты обработки снимков Landsat, созданные лабораторией Global Land Analysis and Discovery (GLAD) университета штата Мэриленд − Global Forest Change (GFC) (Hansen et al., 2013) и Eastern'Europe Forest Cover Change (EEFCC) (Potapov et al., 2015). Они представляют собой растровые слои с пространственным разрешением 30 м, которые содержат данные о нарушениях лесного покрова за период с 1985 по 2012 г. (EEFCC) и с 2001 г. по н.в. (GFC). При этом данные EEFCC включают только 4 класса − потери лесного покрова за 1986–1988, 1989–2000, 2001– 2006 и 2007–2012 гг., тогда как в данных GFC шаг по времени составляет 1 год.

Данные GFC и EEFCC были переклассифицированы на два класса со значениями 0 и 100, которые соответствуют отсутствию и наличию нарушений лесного покрова, и затем суммированы с результатами классификации. Для каждого класса, относящегося к участкам потери лесного покрова, проведено визуальное дешифрирование и определен класс, к которому он относится по определенной ранее легенде. В результате на участках вырубок были выделены три новых класса – вырубки, зарастающие лиственными, смешанными и хвойными лесами (рис. 2.1, табл. 1). Также на основе ранее опубликованных баз данных (Шихов, Зарипов, 2018) были выделены классы крупных гарей и ветровалов.

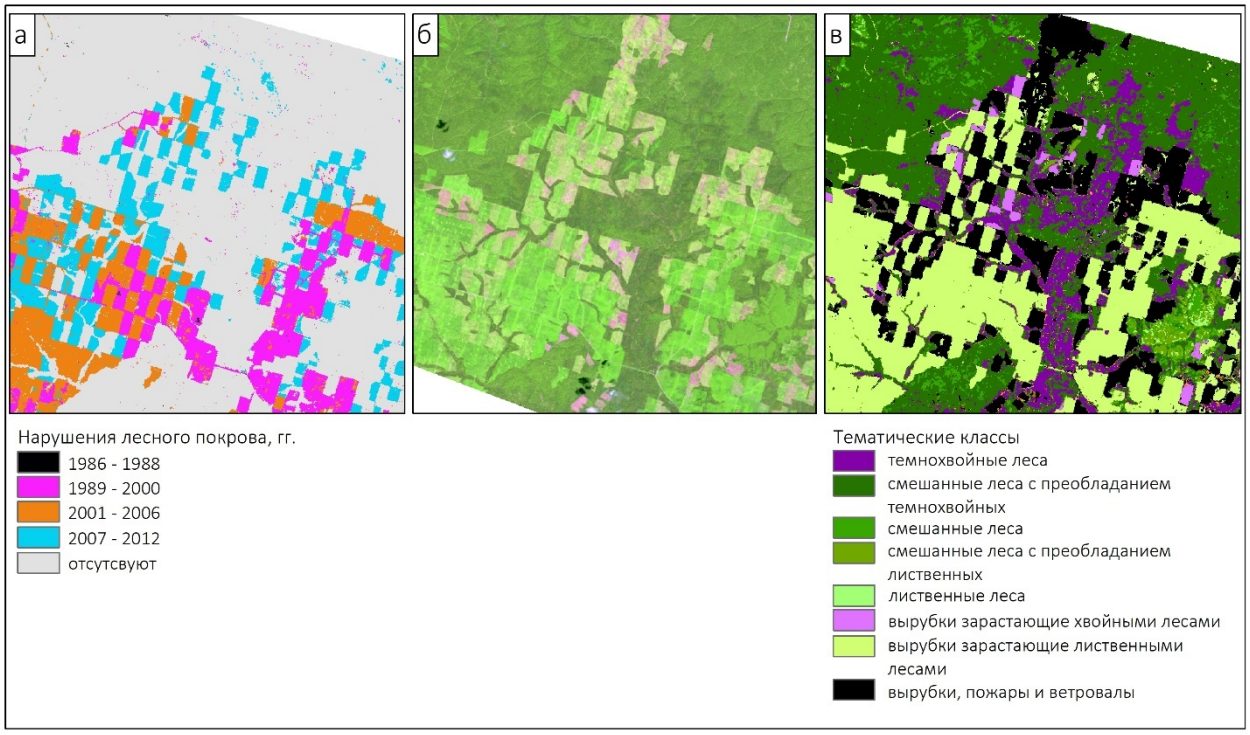


Рис. 2.1. Постобработка результатов классификации на основе данных о нарушениях лесного покрова: а – данные EEFCC, б – снимок Landsat, в – откорректированный результат классификации

Следующим этапом постобработки было выделение населенных пунктов на основе векторного слоя их границ, полученного по векторной картографической основе М 1:200000. Проведена корректировка границ населенных пунктов по каждому снимку, которая включала в себя изменение контура ряда населенных пунктов по границе застроенных территорий. Далее векторные данные были конвертированы в растр с пространственным разрешением, соответствующим результатам классификации, и проведена вышеописанная процедура включения этого класса в результирующий растр.

Аналогичным образом выполнено маскирование участков водной поверхности (для исключения ошибочного распознавания воды) по данным проекта Global Surface Water (Pekel et al., 2016). В качестве водной поверхности рассматривались пиксели, в которых вода была зафиксирована в 75% наблюдений по снимкам Landsat за период с 1984 по 2020 г. Участки пахотных земель были маскированы по данным проекта (Potapov et al., 2021), которые также имеют пространственное разрешение 30 м.

Также постобработка включала в себя исправление ошибок классификации. В первую очередь проведена ручная оцифровка участков каменных россыпей в горах (гольцовый пояс). Каменные россыпи хорошо выделяются по спектральным признакам от горных тундр, но могут иметь признаки, сходные с объектами, расположенными в других высотных поясах (свежими вырубками, нарушенными землями). Для горной части Пермского края характерной ошибкой при классификации снимков было также ошибочное отнесение болот в класс горной тундры. Для исправления данной ошибки также проводилось ручное оконтуривание болот в горной местности с добавлением данного класса в результирующий растр. В рамках постобработки также было проведено выделение зарастающих лесом сельскохозяйственных полей. Для этого использовался созданный в 2020 г. по разновременным снимкам Landsat (за период с 1986 по 2018 г.) набор данных о зарастающих древесной растительностью пахотных землях на территории Пермского края (Белоусова, Брыжко, 2021). В результате совмещения этого слоя с результатами классификации в легенду были добавлены еще два класса – сельскохозяйственные угодья, зарастающие лесами с преобладанием хвойных и лиственных пород (рис. 2.2).

Завершающим этапом постобработки является фильтрация результатов классификации, которая необходима для перехода от характеристик отдельных пикселей к тематическим контурам, а также для улучшения визуального восприятия. Фильтрация полученных растров проводилась с применением фильтра большинства по 8 соседям и с порогом замещения MAJORITY, при котором пикселу присваивается значение большинства ячеек, попавших в матрицу фильтра. Данная операция проведена дважды для каждого растра с результатами классификации. После выполнения фильтрации проведена сшивка растров и создано итоговое покрытие – информационная основа карты растительности Пермского края. Результирующая карта представлена в Приложении 1.

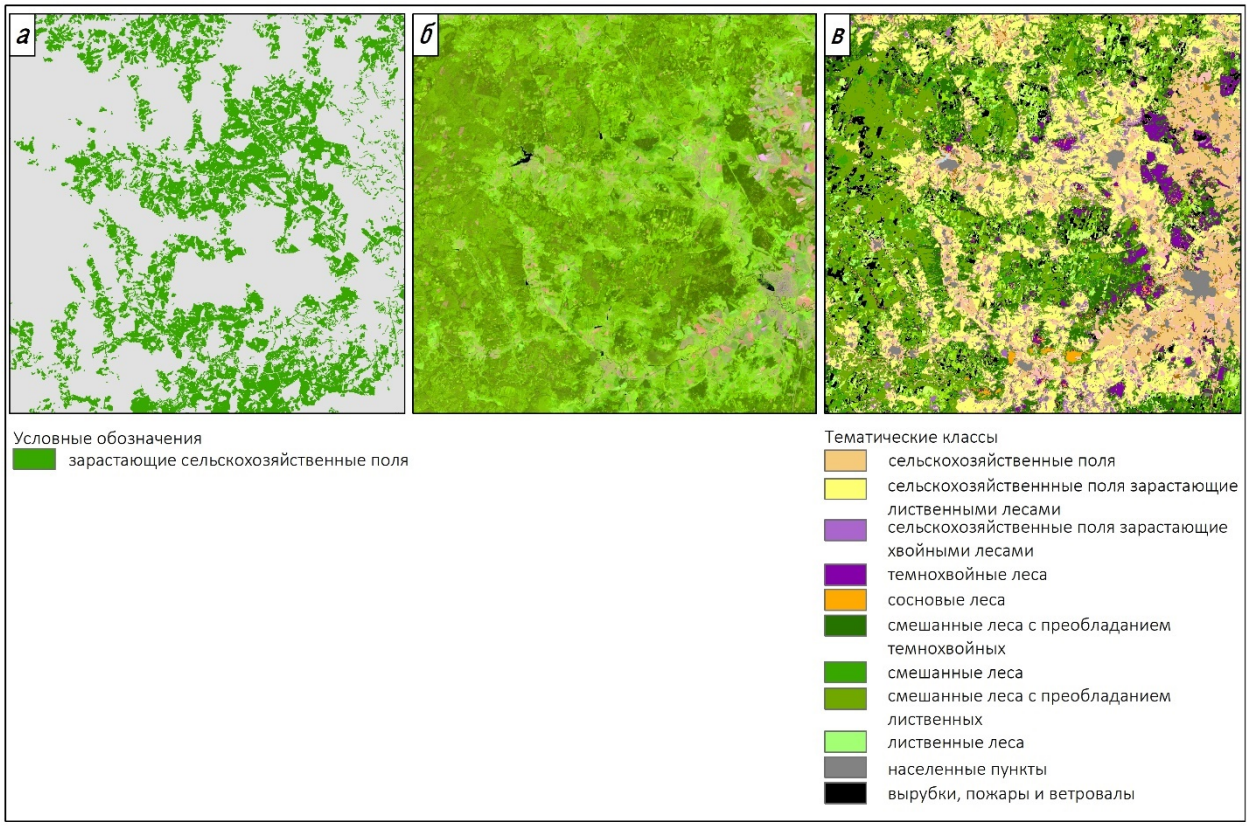


Рис. 2.2. Постобработка результатов классификации на основе данных о зарастающих сельскохозяйственных полях: а – исходные данные о зарастающих полях, б – снимок Landsat, в – откорректированный результат классификации

Верификация созданной карты выполнена по нескольким источникам данных. Изначально для проверки использовались данные о породно-качественных характеристиках лесов из поквартальной базы данных с картографического веб-сервиса «Лесной диспетчер Пермского края» (ИАС «Лесной диспетчер Пермского края», URL: http://gis.rkomi.ru/fires59). Эта база данных включает в себя основные характеристики древостоя (возраст, бонитет, формулу состава и др.) в разрезе лесных кварталов. Данные получены на основе лесоустройства разных лет (с 1990-х гг.) и по ряду лесничеств значительно устарели. На их основе проведено сравнение площадей различных типов леса.

Площади темнохвойных и сосновых лесов по данным (ИАС «Лесной диспетчер Пермского края», URL: http://gis.rkomi.ru/fires59) значительно превышают площади, полученные по результатам классификации. Такая разница в площадях обусловлена тем, что в основе определения

преобладающей породы в поквартальных данных лежит оценка запасов древесины, а не проективного покрытия. Обширные болотные массивы на севере края по данным (ИАС «Лесной диспетчер Пермского края») частично попали в класс сосновых лесов, что привело к завышению их площади. В свою очередь, площади смешанных лесов по результатам классификации оказались больше, чем по квартальным данным (ИАС «Лесной диспетчер Пермского края»). Данное превышение площади связано с тем, что для сравнения в класс смешанных были объединены такие тематические классы, как смешанные леса с преобладанием темнохвойных пород и с преобладанием лиственных пород. Для сравнения был также определен процент совпадения площадей тематических классов. Для различных классов он варьируется от 44 до 69% (в среднем около 54 %).

Также проведено сравнение данных, полученных в результате классификации с данными карты растительности России (Барталев и др., 2011; Барталев и др., 2016), полученными за 2018 г. (рис. 2.3, рис 2.4). В результате выделены классы, площади которых близки по двум источникам данных – темнохвойные леса и смешанные леса с преобладанием темнохвойных. Доля совпавшей площади для них составляет 70 и 52% соответственно. Расхождение по общей площади темнохвойных лесов обусловлено фрагментацией данного класса в связи с многократным различием в пространственном разрешении данных MODIS и Landsat. Наибольшая степень совпадения площадей по двум источникам характерна для лиственных лесов и составляет 78%, при этом для данного класса характерно наиболее сильное расхождение по общей площади. Оно связано с тем, что обширные площади были отнесены к классу смешанных лесов с преобладанием лиственных. Это же привело к превышению площади смешанных лесов с преобладанием лиственных, полученных в результате классификации, над данными карты растительности России. Двукратное расхождение по площади наблюдается для сосновых лесов. Такое расхождение связано с тем, что территории, занятые сосновыми лесами по

данным карты растительности России, при классификации по снимкам Landsat частично попали в класс болот. Также на карте лесов России отсутствуют данные о крупных нарушениях лесов пожарами, которые также происходят в основном в сосновых лесах. В целом доля совпавшей площади составляет от 39 до 78% для разных тематических классов.



Рис 2.3. Сравнение доли площади разных типов леса по полученной карте и карте лесов России

Также проведено сравнение с новым тематическим продуктом Global 30 m Land-Cover Classification with a Fine Classification System (GLC-FCS30) (Zhang et al., 2024), который опубликован позже созданной карты растительности Пермского края. Продукт создан на основе данных спутников серии Landsat, имеет глобальный охват и содержит данные за период с 1985 по 2022 гг. Сравнение с данным продуктом проводилось, так как он имеет размер ячейки 30 м (как и авторская карта) и высокую тематическую детальность. Легенда карты GLC-FCS30 включает 35 классов растительного покрова и землепользования. Для сравнения использовались данные за 2022 год. На территории Пермского края по данным GLC-FCS30 представлен 31 тематический класс, в том числе такие классы древесной

растительности как лиственные, смешанные и хвойные леса, без разделения на светлохвойные и темнохвойные (табл. 2.2).

Таблица 2.2. Сравнение тематических классов, характеризующих древесную растительность авторской карты растительного покрова Пермского края и GLC-FCS30 (Zhang et al., 2024)

Тематические классы полученной карты растительности Пермского края	Тематические классы карты растительности GLC-FCS30
Темнохвойные леса Сосновые леса Смешанные леса с преобладанием хвойных Смешанные леса Смешанные леса с преобладанием лиственных Лиственные леса Вырубки, зарастающие хвойными лесами Вырубки, зарастающие смешанными лесами Вырубки, зарастающие лиственными лесами Сельскохозяйственные поля, зарастающие хвойными лесами Сельскохозяйственные поля, зарастающие лиственными лесами	Разреженный вечнозеленый широколиственный лес Сомкнутый вечнозеленый широколиственный лес Разреженный листопадный широколиственный лес Сомкнутый листопадный широколиственный лес Разреженный вечнозеленый хвойный лес Сомкнутый вечнозеленый хвойный лес Разреженный листопадный хвойный лес Сомкнутый листопадный хвойный лес разреженный смешанный лес (широколистный и хвойный) Сомкнутый смешанный лес (широколистный и хвойный)

При сравнении из двух источников выделены два класса с высокой точностью производителя – хвойные и лиственные леса. Точность производителя для этих классов составляет 76 и 81% соответственно. При этом точность производителя для класса смешанных лесов составляет 37%. Площадь хвойных и лиственных лесов по данным GLC-FCS30 превышает площадь этих классов по данным полученной карты растительности. Однако, обратная ситуация наблюдается для класса смешанных лесов площадь которого по данным авторской карты выше данных GLC-FCS30. Такое расхождение площадей связано с выделением в авторской легенде двух классов смешанных лесов − с преобладанием лиственных и с преобладанием хвойных пород. Значительные площади лесов в результате классификации были отнесены к смешанным с преобладанием лиственных пород, но по данным GLC-FCS30 эти леса попали в класс лиственных. Схожая ситуация

наблюдается и для класса смешанных с преобладанием темнохвойных пород, который на проверочных данных относится к классу хвойных лесов.

На более локальном масштабе было проведено сравнение полученных данных с актуальными (за 2020 г.) материалами лесоустройства Сивинского и Чердынского лесничеств. Материалы лесоустройства представляют собой повыдельные данные с основными таксационными характеристиками лесонасаждений, причем материалы по Сивинскому лесничеству были получены в полном объеме, а по Чердынскому – для нескольких урочищ. Для сопоставления с результатами классификации на основе формулы состава древостоя были выделены классы темнохвойных, сосновых, смешанных и лиственных лесов (табл. 2.3).

Таблица 2.3. Сравнение площадей различных типов леса с данными материалов лесоустройства

Преобладающая порода	Площадь по полученной карте растительности, га	Площадь по материалам леоустройства, га	Площадь совпадения, га	Доля совпавшей площади от общей площади, полученной в результате классификации, %
Сивинское лесничество				
Темнохвойные	116675	174915	83546	72
Сосновые	11343	30782	7967	70
Смешанные	162546	109185	89065	55
Лиственные	12860	30242	5063	39
Чердынское лесничество				
Темнохвойные	159438	222979	109381	69
Сосновые	71121	130271	56655	80
Смешанные	178357	163109	94628	53
Лиственные	63497	3152	2143	4

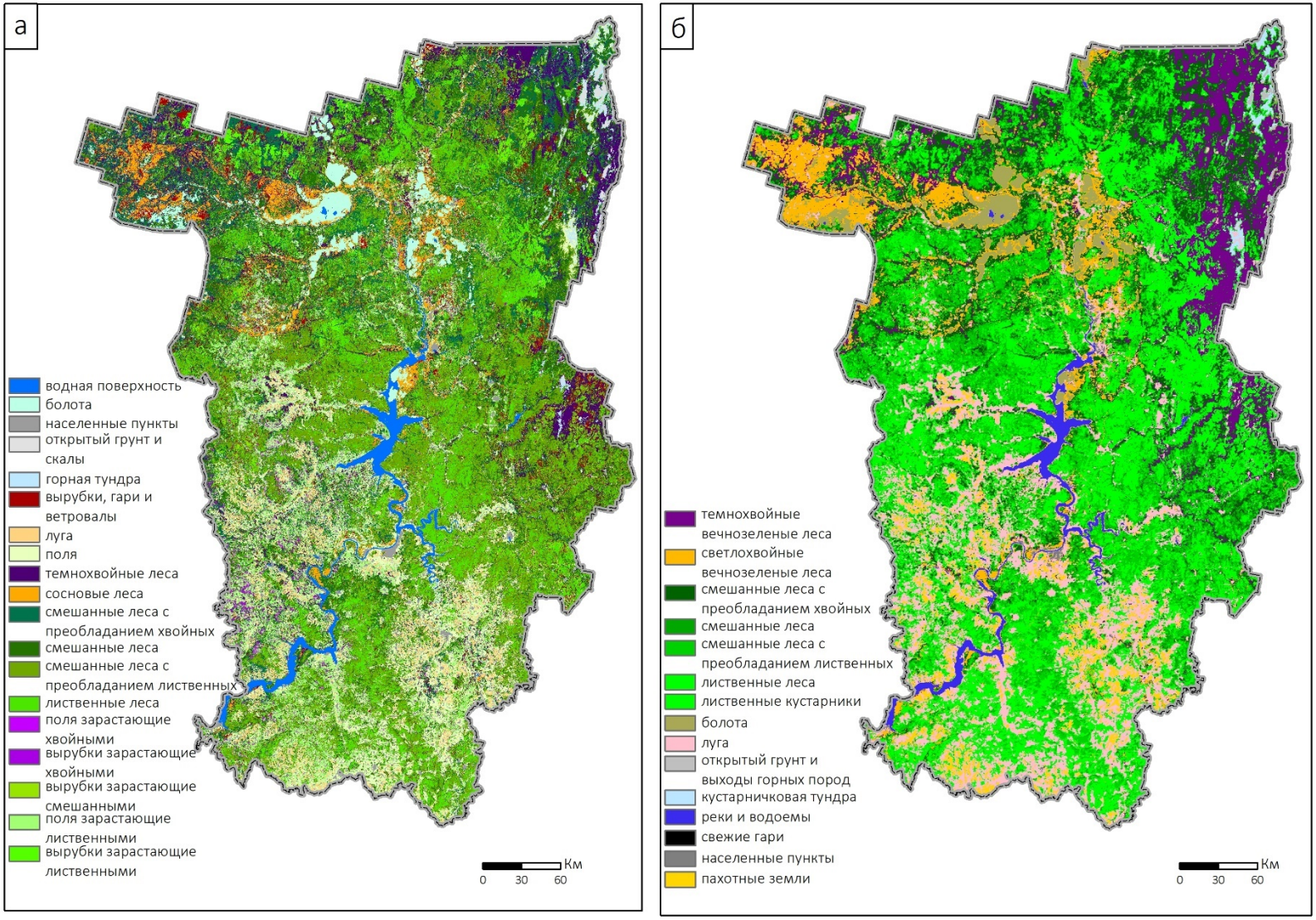


Рис. 2.4. Сравнение карты растительности Пермского края (а) с фрагментом карты растительности России для той же территории (б)

Классы темнохвойных и сосновых лесов характеризуются превышением площади по материалам лесоустройства над данными классификации. Площади сосновых лесов по материалам лесоустройства превышают площади по данным классификации в два раза. Такие расхождения могут быть связаны с тем, что при классификации был выделен класс смешанных лесов с преобладанием темнохвойных (который в проверочных данных отсутствует). Также часть территорий, выделенных по данным классификации как болота, по материалам лесоустройства попала в класс сосновых лесов. Доля площади, совпавшей с проверочными данными, для этих классов составила от 69 до 80%, а для класса смешанных лесов − около 55%. При этом площадь смешанных лесов по данным классификации больше, чем по материалам лесоустройства. Расхождения обусловлены тем, что обширные площади, определенные в результате классификации как лиственные леса, по материалам лесоустройства попали в класс смешанных лесов. Но наибольшие расхождения характерны для класса лиственных лесов, поскольку лиственные леса по данным лесоустройства сильно пересекаются со смешанными лесами с преобладанием лиственных пород по данным классификации.

2.2. Формирование базы данных предикторов для оценки уязвимости лесов

Для формирования базы данных предикторов использовались данные о ветровалах, произошедших в лесной зоне ЕТР. На территории Пермского края произрастают разные типы леса – от средней тайги на севере до смешанных хвойно-широколиственных лесов на юге. При этом их характеристики близки к характеристикам лесов ЕТР в целом, что связано с общими условиями формирования лесного покрова. Также выбор случаев ветровалов за пределами региона исследования позволяет адаптировать методику для других регионов со схожими характеристиками насаждений.

Для формирования обучающего набора данных выбраны 7 случаев крупных ветровалов, которые произошли в разных частях лесной зоны ЕТР.

Контуры ветровалов получены из базы данных ветровалов в лесной зоне России (Шихов и др., 2023). Их пространственное расположение показано на рис. 2.5. Выбраны только ветровалы, вызванные шквалами, т.к. смерчевые ветровалы по площади значительно меньше, и их общий вклад составляет около 13% по данным (Шихов и др., 2023). Также предпочтение отдавалось случаям, которые произошли после 2015 г., т.е. после начала работы спутниковой миссии Sentinel-2, что позволяло использовать эти снимки для выделения преобладающих лесообразующих пород на участках, которые подверглись воздействию ветровала. Общая площадь ветровалов, включенных в выборку, составляет 60,6 тыс. га, или 15% от всей известной площади ветровалов в лесной зоне ЕТР за период с 1985 по 2024 гг.

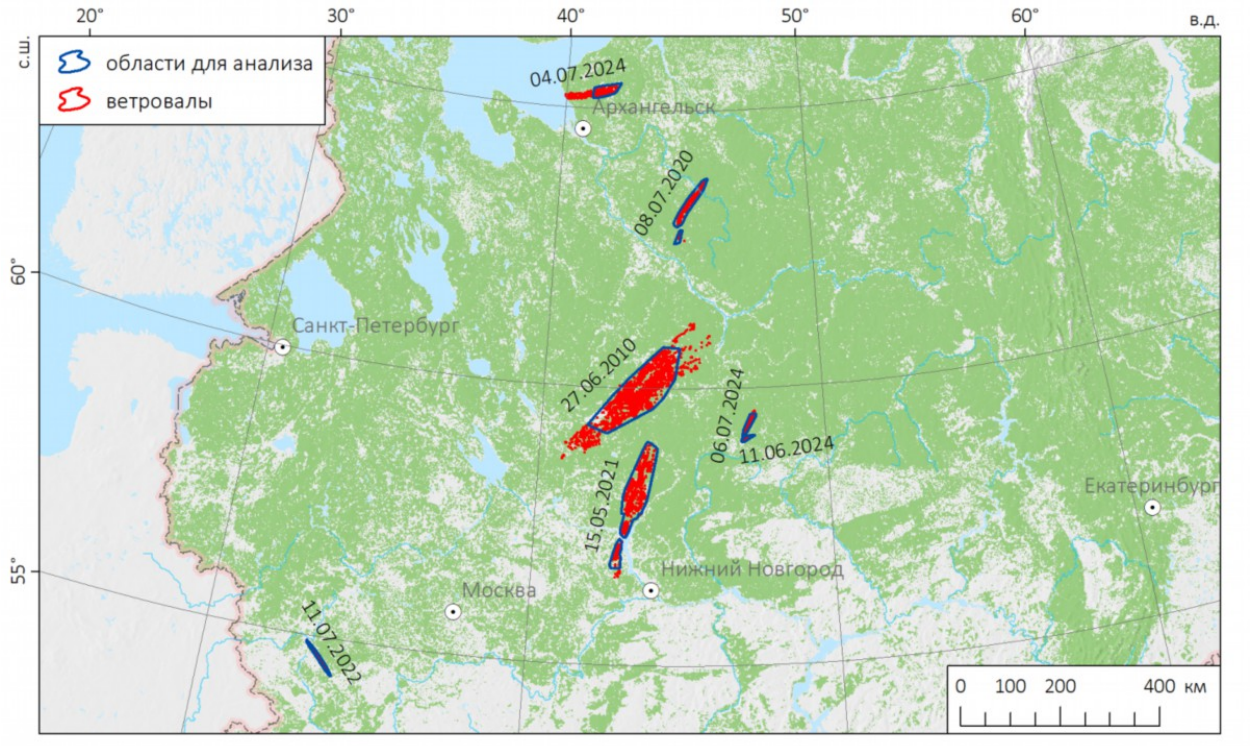


Рис. 2.5. Случаи ветровалов, включенные в обучающую выборку

Подготовка данных о характеристиках насаждений в основном выполнена по схеме, аналогичной ранее использованной (Шихов, Дремин, 2021) при анализе факторов, определяющих повреждение лесов ветровалами на ЕТР и на Урале. Преобладающие породы в древостое были определены на основе последнего предшествующего ветровалу безоблачного снимка со

спутника Sentinel-2 (в одном случае использованы данные Landsat). Выполнена классификация выбранных сцен Sentinel-2 с применением обучаемого алгоритма Random Forest Classifier в пакете ESA SNAP 9.0. Для классификации были подготовлены изображения, включающие пять наиболее информативных спектральных каналов: зеленый, красный, красный крайний (для данных Sentinel-2), ближний ИК и средний ИК, приведенных к пространственному разрешению 20 м. Для данных Landsat использованы 4 спектральных канала (зеленый, красный, ближний ИК и средний ИК). При формировании обучающих выборок использовались известные спектральные характеристики основных лесообразующих пород (Курбанов и др., 2015) и карта растительности России (Барталев и др., 2016). Были выделены классы по преобладающей породе в древостое (темнохвойные, сосновые, смешанные леса с преобладанием лиственных и с преобладанием хвойных пород, мелколиственные леса), аналогично легенде карты (Барталев и др., 2016). Значения метрики Precision для отдельных классов, рассчитанные непосредственно в пакете ESA SNAP при делении выборки на обучающую и тестовую, составляли от 0,8 – 0,85 для классов, наиболее близких в пространстве признаков (например, для сосновых и сосновых заболоченных лесов), до 1,0 наиболее хорошо различимого класса водоемов. Оценка на независимой выборке не проводилась, по причине отсутствия таких данных.

Для 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. По данным продуктов обработки данных Landsat – Global Forest Change (Hansen et al., 2013) и Eastern’Europe Forest Cover Change (Potapov et al., 2015) выделены сравнительно крупные (3 га и более) нарушения лесного покрова, произошедшие за период с 1986 г. до года, когда произошёл ветровал. Все лесопокрытые участки, попадающие в эти области, были классифицированы как молодняки. Также для каждого участка были получены наиболее ранние в ряду наблюдений зимние безоблачные снимки

Landsat-TM, по которым проводилось маскирование лесопокрытых территорий. Все участки, которые в 1985–1987 гг. ещё были не покрыты лесом, а по снимку, полученному до ветровала, классифицированы как лесопокрытые территории, также были отнесены к молоднякам. В группу молодняков попадают леса, восстанавливающиеся на вырубках и гарях, а также на неиспользуемых сельскохозяйственных угодьях. Все смешанные и темнохвойные леса, не попавшие в группу молодняков, классифицированы как спелые и перестойные. Пример результата классификации после постобработки приведён на рис. 2.6.

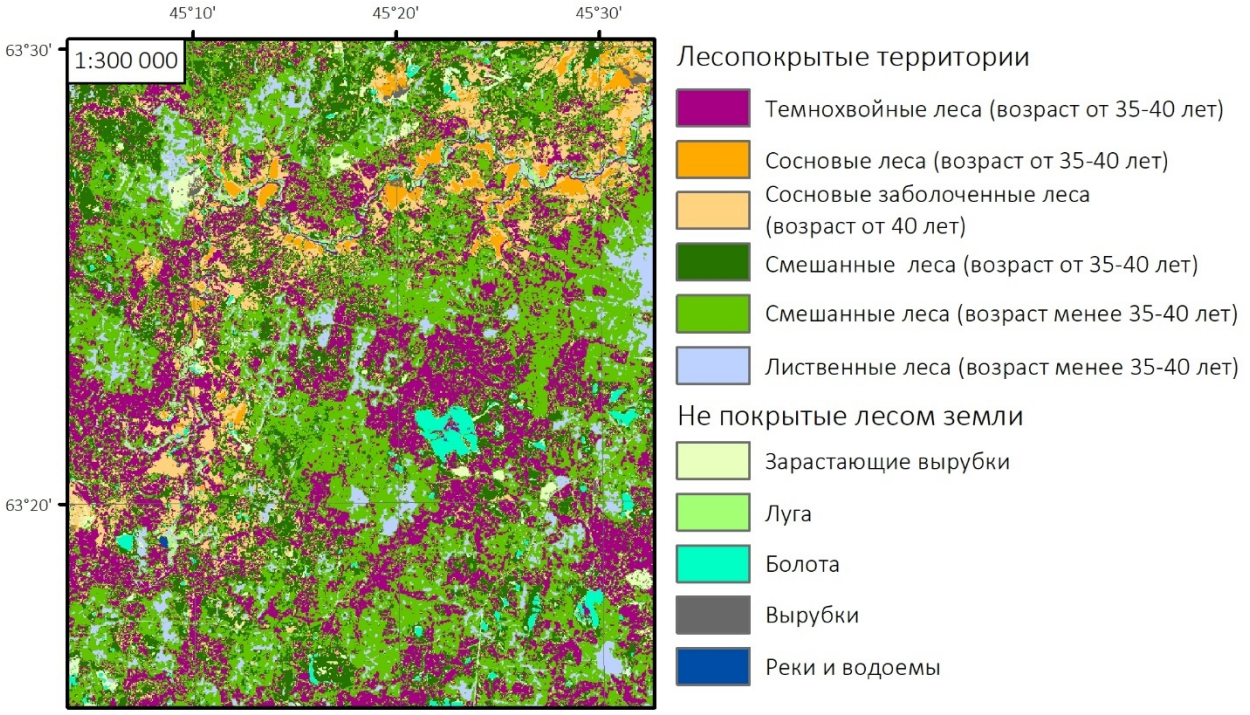


Рис. 2.6. Результаты классификации участка по преобладающей лесообразующей породе

Помимо лесообразующих пород, оценивались также высота древостоя по данным Global Forest Canopy Height (Potapov et a., 2020) и запас древесины по данным GlobBiomass (Santoro et al., 2021) (рис.2.7). Размер ячейки этих данных составляет 30 м и 100 м соответственно. Влияние соседства со свежими вырубками оценивалось на основе отношения доли площади свежих (возрастом до 10 лет) вырубок к общей площади леса в каждой ячейке расчетной сетки. Также были построены буферные зоны вокруг этих вырубок и рассчитано отношение площади буферных зон к общей площади ячейки.

Ширина буферной зоны принята равной 150 м, поскольку в работе (Шихов, Дремин, 2021) было показано, что площадь ветровалов в пределах этих буферных зон в 1,5-2 раза выше, чем в среднем по пострадавшим от ветровала участкам.

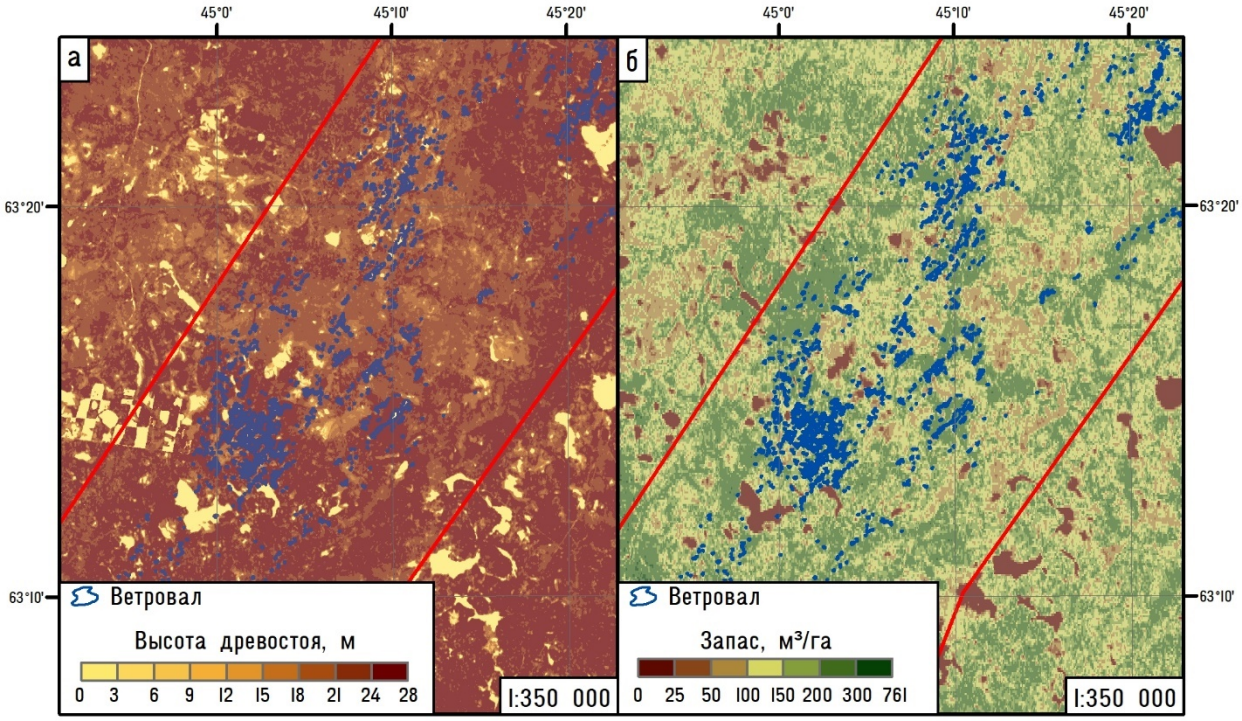


Рис. 2.7. Пример пространственного распределения независимых переменных: а –высота древостоя, б – запас

Среди характеристик рельефа рассмотрены высота местности, уклон, выпуклость склона (Convexity), доля площади положительных форм рельефа на основе классификации форм рельефа и специализированный параметр Wind Effect, характеризующий влияние экспозиции и уклона склона на скорость ветра (рис. 2.8). Все эти переменные были рассчитаны средствами ГИС SAGA по ЦМР FABDEM (Forest And Buildings removed Copernicus DEM) (Hawker et al., 2022). Выбор ЦМР FABDEM обусловлен тем, что она является единственной глобальной моделью рельефа, которая не учитывает высоты зданий и деревьев в качестве поверхности рельефа и обладает наибольшей точностью для лесопокрытых территорий.

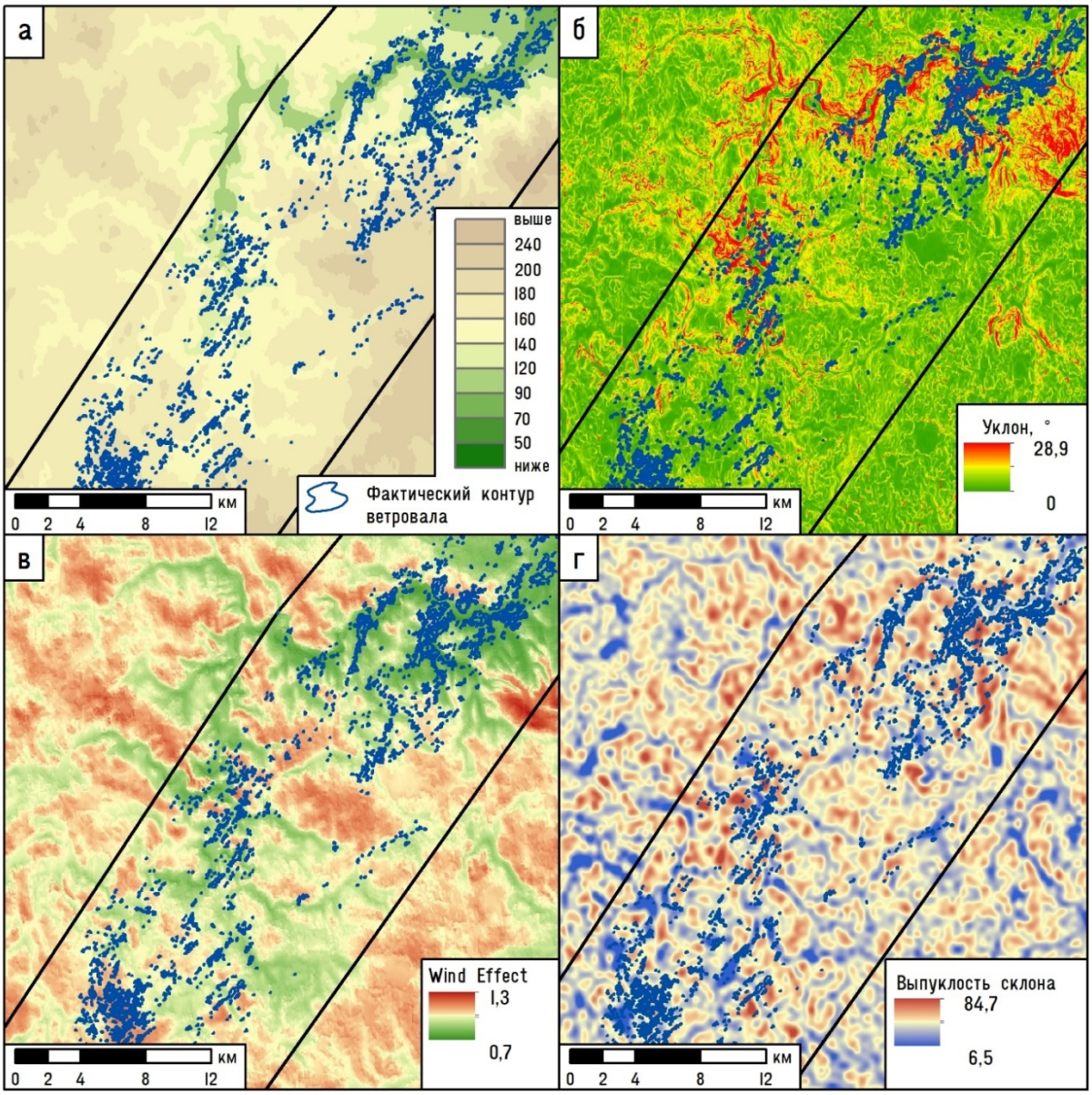


Рис. 2.8. Пример пространственного распределения независимых переменных: а – высота над уровнем моря, б – уклон, в – параметр Wind Effect, г – выпуклость склона

Индекс наветренного и подветренного склона (Windward/Leeward Index или Wind Effect) представляет собой коэффициент усиления или ослабления ветра, рассчитываемый по ЦМР и заданному направлению ветра (Boehner, Antonic, 2009). Направление ветра при расчёте было задано аналогичным направлению движения шторма. Статистически значимая зависимость повреждения лесов ветровалами от значений этого индекса была показана, в частности, в работе (Шихов, Дремин, 2021).

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

Области, подвергшиеся воздействию ветровалов, были выделены путем построения минимального ограничивающего многоугольника (convex hull) вокруг ветровала. В пределах каждой области были построены прямоугольные сетки с размером ячейки 500×500 м, и в каждой ячейке рассчитаны значения предикторов и предиктанта. В качестве предиктанта (зависимой переменной) рассматривалась доля площади ветровала от площади леса в ячейке, а в качестве предикторов (независимых переменных) – 16 характеристик лесных насаждений и рельефа, определяющих уязвимость лесов (перечень приведен в табл. 2.4). Данные были представлены в виде таблицы, где каждой ячейке сетки соответствовали 16 значений предикторов и значение предиктанта. Выбор размера ячейки 500×500 м обусловлен соблюдением баланса между вычислительными ресурсами и детальностью данных. Все предикторы были приведены в количественный вид (в частности, рассчитана доля площади каждой ячейки с преобладанием той или иной лесообразующей породы).

Объем выборки составил 101235 ячеек, из них 22,5% ячеек с ненулевой площадью ветровала. Средняя доля лесопокрытой площади в ячейке составляет 75,6%, средняя доля площади ветровала 3,3% (для ячеек с ненулевой площадью ветровала – 14,3%), стандартное отклонение доли площади ветровала 0,112 (11,2%). Учитывая несбалансированность полной выборки, была также создана выборка с равным количеством ячеек с ветровалами и без них (по 22795 ячеек). В этой выборке средняя доля площади ветровала составила 7,2%, а ее стандартное отклонение 15,8%.

Таблица 2.4**.** Перечень предикторов и источники данных

Переменная	Размер ячейки, м	Источник данных и способ получения
Доля площади темнохвойных лесов от площади ячейки	20 (при использовании данных Landsat - 30)	Классификация спутниковых снимков Sentinel-2 или Landsat, полученных до ветровала (в летний сезон), с последующей постобработкой
Доля площади сосновых лесов от площади ячейки		
Доля площади сосновых заболоченных лесов от площади ячейки		
Доля площади смешанных лесов от площади ячейки		
Доля площади лиственных лесов от площади ячейки		
Доля площади хвойных молодняков (возраст менее 35-40 лет) от площади ячейки		
Доля площади смешанных молодняков (возраст менее 35-40 лет) от площади ячейки		
Доля площади лиственных молодняков (возраст менее 35-40 лет) от площади ячейки		
Доля площади леса от площади ячейки		
Высота древостоя, м	30	Продукт Global Forest Canopy Height, данные за 2020 г. (Potapov et al., 2022)
Биомасса (запас древесины)	100	Продукт GlobBiomass (Santoro et al., 2021). Данные за 2021 г.
Доля площади свежих вырубок (возраст 10 лет и менее)	30	Продукт Global Forest Change (Hansen et al., 2013). Данные за 2010-2023 гг., в зависимости от даты ветровала
Доля площади буферных зон (150 м) вокруг свежих вырубок (возраст 10 лет и менее)	30	
Угол наклона склонов	30	Цифровая модель рельефа (ЦМР) FABDEM (Hawker et al., 2022)
Выпуклость склонов (Convexity)		
Доля площади положительных форм рельефа на основе классификации форм рельефа (TPI-Based Landforms Classification)		
Индекс наветренного и подветренного склона (Wind Effect)		

2.3. Расчет уязвимости лесов и оценка его достоверности

Для оценки уязвимости лесов к ветровому воздействию создана модель машинного обучения на основе метода случайного леса в постановке задачи регрессии (Random Forest Regressor). Это ансамблевый метод машинного обучения, который характеризуется высокой точностью прогнозов и устойчивостью к выбросам и несбалансированным выборка, что делает его эффективным инструментом для решения подобных задач (Бэггинг и случайный лес, URL: https://habr.com/ru/articles/801161/). Модель позволяет обрабатывать наборы данных с множеством переменных, что обеспечивает комплексный подход к оценке уязвимости лесов. Также модель дает оценку важности признаков, что помогает определить ключевые факторы, определяющие уязвимость лесов к ветровалам. В связи с данными особенностями модели она широко применяется для решения задач оценки риска ветровалов (Albrecht et al., 2019, Pawlik et al. 2022; Stritih et al. 2021).

Для проверки соответствия данных нормальному распределению проведен тест Шапиро-Уилка (Shapiro, Wilk., 1965). Уровень статистической значимости установлен на уровне 0,01. Анализ переменных показал, что большинство показателей демонстрируют положительную асимметрию (приложение 2.). Основная масса значений сосредоточена в области низких величин, при этом наблюдается длинный правый «хвост» в распределении, образованный редко встречающимися высокими значениями переменных. Распределение таких показателей как доля площади свежих вырубок и доля буферных зон вокруг них достаточно близко к равномерному.

Тест Шапиро-Уилка подтвердил, что распределение предикторов уязвимости к ветровалам статистически значимо отличается от нормального. Наиболее сильные отклонения от нормального распределения характерны для доли площади молодняков разного типа леса, доли площади свежих вырубок и доли площади буферных зон вокруг них. Полученный результат также подтвердил тест Харке-Бера (Brys et al., 2004).

Предварительный анализ данных для обучения модели включал построение корреляционной матрицы на основе коэффициентов корреляции (R) Спирмена с уровнем значимости равным 0,05. Выбор корреляции Спирмена обусловлен тем, что распределение большинства предикторов и предиктанта не соответствует нормальному закону. В ходе обучения модели также выполнена оценка значимости предикторов как стандартным методом, так и методом случайного перемешивания значений каждого признака (permutation importance) Обе оценки приведены в табл. 2.5. Случайное перемешивание значений признака является практически универсальным инструментом для оценки значимости признаков в моделях машинного обучения (Hooker et al., 2022). Оно показывает, насколько снизится общая точность модели при случайной точности, тем более значим этот признак).

Также построена тепловая карта матрицы корреляции (Приложение 3) для всех ячеек с ветровалами (коэффициент Спирмена). Выявлена высокая корреляция между высотой древостоя (Tree_height) и биомассой (Volume). Несмотря на высокую корреляцию данных переменных они не исключены из анализа так как в исследованиях, посвященных оценке риска ветровалов, учитываются и запас, и высота древостоя (Peltola et al., 1999; Dobbertin, 2002; Seidl et al., 2011; Hanewinkel et al., 2014). Высота и запас древесины также сильно коррелируют с площадными характеристиками нарушений лесного покрова (доля площади свежих вырубок (cutted_area) и доля площади буферных зон вокруг свежих вырубок (buffer_area) это объясняется концентрацией вырубок в спелых лесах. Среди характеристик местоположения высокая корреляция наблюдается между уклоном (SLOPE) и долей площади положительных форм рельефа (LANDFORMS). Данные характеристики содержательно отличаются друг от друга так как уклон это числовой параметр, характеризующий крутизну склона, а доля положительных форм рельефа — это результат классификации территории на разные формы рельефа.

Таблица 2.5. Коэффициенты корреляции (R) Спирмена между предиктантом и предикторами, и результаты оценки значимости предикторов

Переменная	R Спир-мена	Значимость предиктора в Random Forest	
		Стандартная	На основе случайного перемешивания значений признака
Доля площади темнохвойных лесов (возраст от 35-40 лет) от площади ячейки	0,14	0,069	0,011
Доля площади сосновых лесов (возраст от 35-40 лет) от площади ячейки	0,12	0,081	0,027
Доля площади сосновых заболоченных лесов (возраст от 40 лет) от площади ячейки	0,02	0,020	0,00
Доля площади смешанных лесов (возраст от 35-40 лет) от площади ячейки	0,11	0,069	0,011
Доля площади темнохвойных лесов (возраст менее 35-40 лет) от площади ячейки	–0,02	0,041	0,019
Доля площади смешанных лесов (возраст менее 35-40 лет) от площади ячейки	0,04	0,053	0,027
Доля площади лиственных лесов (возраст менее 35-40 лет) от площади ячейки	–0,08	0,058	0,038
Доля площади леса от площади ячейки	0,08	0,059	0,002
Высота древостоя, м	0,04	0,095	0,10
Биомасса (запас древесины)	0,07	0,105	0,031
Доля площади свежих вырубок (возраст 10 лет и менее)	0,03	0,024	0,00
Доля площади буферных зон (150 м) вокруг свежих вырубок (возраст 10 лет и менее)	0,03	0,024	0,00
Уклон	0,09	0,073	0,005
Выпуклость склонов (Convexity)	0,03	0,071	0,005
Доля площади положительных форм рельефа на основе классификации форм рельефа	0,07	0,059	0,005
Индекс наветренного и подветренного склона (Wind Effect)	–0,04	0,085	0,006

Обучение моделей случайного леса выполнено с использованием библиотеки Scikit-learn на языке программирования Python. Данные по ветровалам были разделены на обучающий и тестовый наборы с помощью модуля train_test_split библиотеки Scikit-learn. В функцию передаются как вектор признаков, так и целевой вектор. Оценка точности выполнена по значениям базовой ошибки модели (среднеквадратичной ошибки), которая рассчитывается на основе разности фактической и прогнозируемой доли площади вывала леса (то есть оценивается среднеквадратичная разница между оценочными и истинными значениями). Был выполнен подбор

параметров модели для минимизации значений ошибки. В итоге ее значение составило 0.00265, а в относительном выражении − 5,32% от среднего значения площади ветровалов в ячейке по всей выборке. Такой результат можно считать удовлетворительным, и данная модель была использована для оценки аналогичной характеристики (доли площади ветровалов от площади леса) на независимых данных по территории Пермского края. Для модели, обученной на сбалансированной выборке (с равным количеством ячеек с ветровалами и без них) базовая ошибка составила 0.00225, что несколько меньше, чем для модели, обученной на полной выборке, а доля необъясненной вариации − 0.088.

Полученная модель была использована для решения задачи на независимых данных – оценки уязвимости к ветровалам лесов Пермского края. Для оценки уязвимости лесов Пермского края к ветровому воздействию был использован тот же перечень предикторов, как и в обучающей выборке, и та же структура данных (в виде таблицы, включающей 16 предикторов). Однако площадь ячейки расчетной сетки была увеличена до 1 км^2, в результате объем выборки составил 160,9 тыс. ячеек. Изменение шага сетки для территории Пермского края с 500 м до 1 км обусловлено большой площадью территории и затратами на вычисление (осреднение) характеристик предикторов в ячейках сетки 500×500 м.

Для оценки преобладающих лесообразующих пород в ячейках использована ранее созданная карта растительности Пермского края. Также при расчете параметра Wind Effect выполнено взвешенное осреднение площади ветровалов по фактическим данным (с учетом площади вывала леса, которая приходится на каждое направление ветра). Данные о направлении ветра получены из базы данных (Шихов и др., 2023). В Пермском крае преобладают ветровалы при южном или юго-западном направлении ветра, на которые приходится более 70% площади. Соответственно, в итоговом наборе данных Wind Effect наибольшие значения имеют склоны южной и юго-западной экспозиции.

На основе полученного набора данных была рассчитана ожидаемая доля площади ветровала от площади леса в каждой ячейке сетки при условном равномерном ветровом воздействии по всей территории края (аналогичным по интенсивности случаям из обучающей выборки). Эта характеристика рассматривается как уязвимость лесов к ветровому воздействию. Отметим, что ее количественные значения многократно превышают фактическую площадь ветровалов, поскольку сами шквалы, с которыми связана основная часть ветровалов в Пермском крае, имеют локальную природу. Оценка уязвимости получена для всех ячеек сетки, в которых лесом покрыто более 10% площади. Полученные данные были отображены на карте и сопоставлены с фактическим распределением ветровалов по территории края за период с 1986 по 2023 гг. − всего 306 случаев на общей площади 52073 га, согласно актуализированной базе данных (Шихов и др., 2023).

По причине большого объема выборки (101235 ячеек), все корреляции между предикторами и предиктантом (табл. 2.5.) оказались статистически значимыми. Наиболее сильные положительные корреляции со значением предиктанта получены для доли площади темнохвойных, сосновых и смешанных лесов, а отрицательные – для доли площади лиственных лесов возрастом менее 40 лет. Это соответствует ранее опубликованным данным (Петухов, 2016; Шихов, Дремин, 2021). Наиболее важным признаком по результатам оценки с помощью метода случайного перемешивания значений оказалась высота древостоя, а при оценке значимости стандартным методом – также и запас древесины. Высота древостоя и запас древесины имеют положительные корреляции с предиктантом на всех рассматриваемых участках, в отличие от доли сосновых и темнохвойных лесов, которые в некоторых случаях имели и отрицательные корреляции. Для модели, обученной на сбалансированной выборке, самым важным предиктором оказалась доля смешанных лесов в ячейке, запас древесины и высота древостоя также имеют высокую значимость.

Учитывая в среднем низкую долю площади ветровалов от площади ячеек (3,3%) и высокую долю ячеек с нулевыми значениями (77,5%), было также выполнено агрегирование данных по значениям предикторов. Для этого вся выборка была отсортирована по значениям предиктора от меньшего к большему и разбита на 100 групп, равных по количеству объектов (по 1% объектов в каждой группе). Далее для каждой группы оценивалось среднее значение предиктора и предиктанта, и корреляция между ними. Самая сильная корреляция таким способом выявлена между запасом древесины по данным GlobBiomass и долей площади ветровала в ячейке (R=0.63), что соответствует результатам оценки значимости признаков (Рис 2.9).

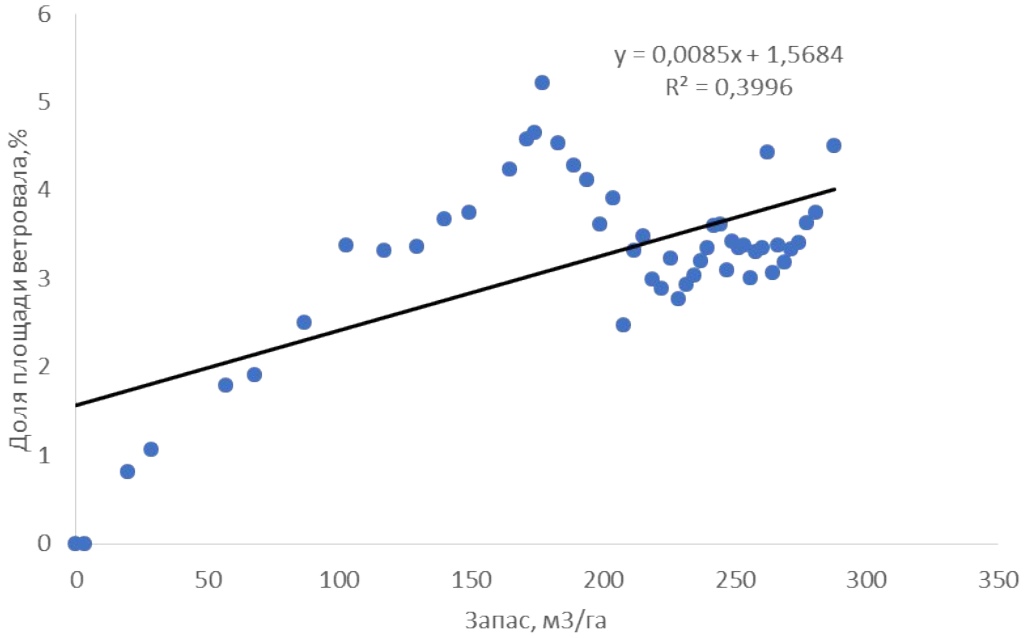


Рис. 2.9. Зависимость между средним по ячейке запасом древесины по данным GlobBiomass и долей площади ветровала в ячейке

Для проверки способности модели случайного леса воспроизводить пространственное распределение участков вывала леса на локальной территории были проведены эксперименты с изъятием отдельных ветровалов из обучающей выборки, с последующим их использованием в качестве независимых проверочных данных. Для этого были выбраны ветровалы, которые произошли в июне и июле 2024 г. в Кировской области (на них приходится всего около 3% от общего объема выборки). Результат расчета

доли площади ветровала от площади леса в ячейках по модели и сравнение его с фактическими данными приведены на рис. 2.10.

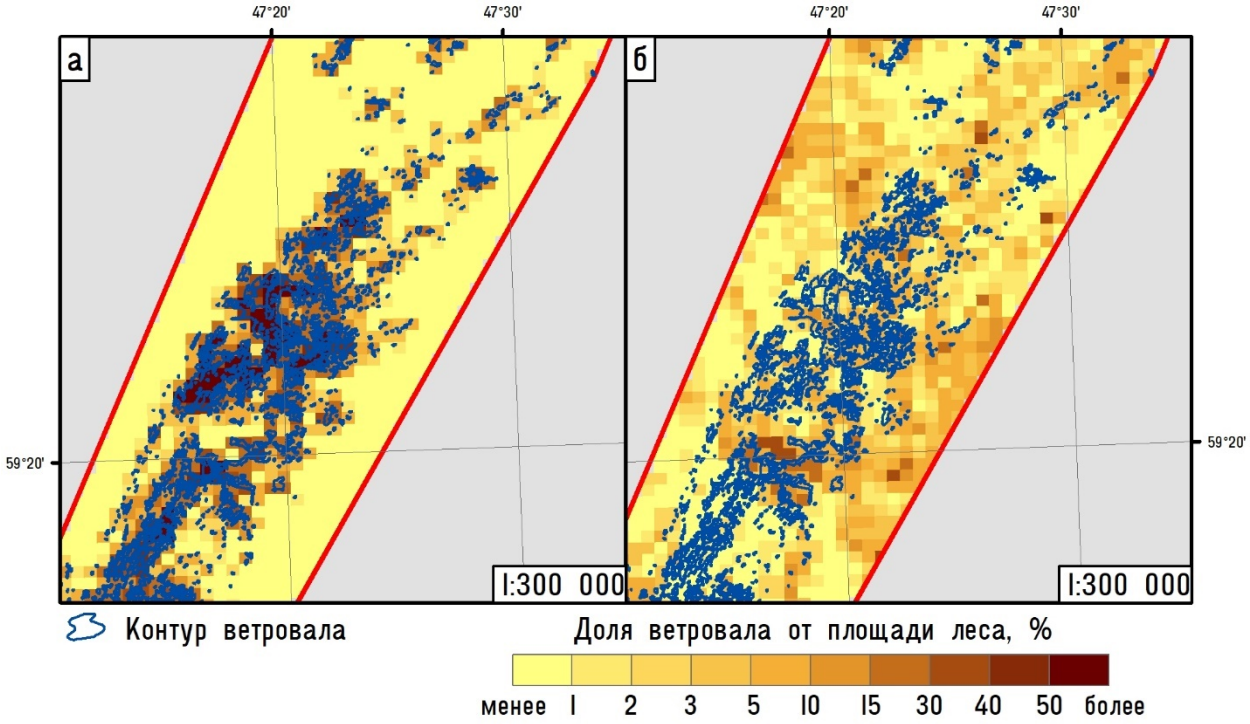


Рис. 2.10 Ожидаемая доля площади ветровала от лесопокрытой площади (расчет по модели случайного леса) для ветровала в Кировской области 06.07.2024 г.: а – фактическая доля площади ветровала от площади ячеек; б – результат моделирования с помощью случайного леса

В данном случае модель случайного леса существенно занижает площадь ветровалов – средняя фактическая доля площади ветровала от площади леса составила 9,6%, а по модели – всего 3,6%. Это обусловлено тем, что модель дает несмещенную оценку относительно обучающей выборки (в которой средняя доля площади вывала леса составляет около 3,5%). Корреляция между результатами расчета и фактической площадью ветровала в ячейках низкая (R=0,08), хотя и статистически значимая. Модель дает сглаженную оценку в сравнении с фактическими данными, то есть доля площади ветровала завышена на тех участках, где фактически ветровал не наблюдался и занижена там, где отмечен сплошной ветровал. Неудовлетворительный результат обусловлен тем, что в модели не учитываются различия в скорости ветра на участке, который подвергся

воздействию шквала, а такие различия при локальных шквалах обычно весьма значительны.

Оценка уязвимости лесов Пермского края к ветровому воздействию представлена в Приложении 4. Результаты расчета уязвимости классифицированы на 10 классов методом квантилей так, что в каждый класс попадает по 10% ячеек (в первый класс – нижние 10% значений, в 10-й класс – верхние 10%). Среднее значение предиктанта (ожидаемая доля площади ветровала от площади леса при равномерном ветровом воздействии на всю территорию края) составляет 11,1%, тогда как фактическая доля площади ветровалов от площади лесов в Пермском крае – всего 0,43%. Из 160,9 тыс. ячеек сетки ветровалы присутствуют лишь в 9878 ячейках (6,13%). Такое расхождение обусловлено тем, что ветровое воздействие, способное вызвать сплошной ветровал (сильный шквал, смерч, очень сильный ветер) является редким и локальным событием. Лишь незначительная часть площади лесов региона подвергалась ветровому воздействию такой интенсивности за рассматриваемый период.

Достоверность полученной оценки уязвимости выполнена как визуально, так и на основе сопоставления расчетной и фактической доли площади ветровалов в ячейках сетки. Визуальная оценка показывает, что в целом уязвимость лесов растет от южных районов к северным, что соответствует фактическому распространению ветровалов за последние 40 лет. Наиболее высокую оценку уязвимости получили северо-западные районы с преобладанием сосновых лесов и участки первичных темнохвойных лесов на северо-востоке края, где фактически наблюдается наибольшая площадь ветровалов. В центральной и южной части края наибольшую оценку уязвимости также имеют сосновые леса (в частности, вдоль Камского водохранилища) и небольшие участки сохранившихся темнохвойных лесов, такие как заповедник «Басеги» (на территории последнего ветровалы также имели место). Обширные площади вторичных лиственных лесов на всей территории края, особенно на юге, отнесены к

классу с очень низкой уязвимостью, и фактически здесь ветровалы наблюдаются крайне редко даже в районах, где доля лесопокрытой площади составляет 70-90%.

Такое пространственное распределение показывает, что расчетная уязвимость в значительной степени определяется возрастом лесных насаждений, хотя этот предиктор в обучающих данных был представлен лишь в виде бинарной классификации (молодняки и прочие леса). Согласно данным (Potapov et al., 2017), обширные площади малонарушенных темнохвойных лесов в Пермском крае встречаются лишь на северо-востоке региона в границах крупных ООПТ (заповедник Вишерский, охраняемый ландшафт Кваркуш), и эти участки имеют самую высокую оценку уязвимости. В южной и центральной части края крупных массивов первичных лесов нет, они встречаются небольшими фрагментами в водоохранных зонах и в пределах ООПТ. Эти участки также получили наиболее высокую оценку риска.

Для количественной оценки рассчитаны R Спирмена между расчетной и фактической долей площади ветровала от площади лесов в ячейках сетки. При расчете по исходной выборке (160,9 тыс. ячеек) R достаточно низкий (0,10), хотя и статистически значимый. Если рассматривать только 9878 ячеек с ненулевой фактической площадью ветровала, значение R еще ниже (0,05), поскольку в пределах этих областей ветровое воздействие также было разным по интенсивности. Такая низкая корреляция обусловлена тем, что при расчете уязвимости лесов не учитывается фактор неоднородности ветрового воздействия по территории. Штормовые события, вызывающие ветровалы, являются редкими и охватывают за исследуемый период лишь незначительную часть изучаемой территории, что хорошо видно на карте в Приложении 4. В частности, выделяются обширные участки лесов с высокой уязвимостью, в пределах которых не было ветровалов, так как они не подвергались за рассматриваемый период такому ветровому воздействию.

Альтернативным способом оценки было сравнение расчетной и фактической доли площади ветровала по классам уязвимости. Такая оценка выполнена для результатов классификации на 10 классов (прил .4.) и на 100 классов (рис. 2.11), обе классификации выполнены методом квантилей по величине расчетной доли площади ветровалов (расчетной уязвимости). По результатам расчета для 100 групп выявлена сильная корреляция между фактической и прогнозируемой площадью ветровалов (R_2 = 0,67). При разбиении на 10 классов также выявлено хорошее соответствие фактической и расчетной площади ветровалов (табл. 2.6). Повышение коэффициента корреляции между расчетной уязвимостью и фактической площадью ветровала при агрегировании данных обусловлено тем, что в лесах, которые относятся к классам с низкой расчетной уязвимостью, например в лиственных молодняках (классы 1-2 в табл. 2.6), ветровалы маловероятны даже при очень сильном ветровом воздействии. В пределах классов 3-8 доля площади ветровала различается слабо, что может объясняться как особенностями распределения штормовых событий за последние 40 лет, так и несовершенством самой модели случайного леса.



Рис. 2.11. Зависимость между фактической и расчетной (по модели случайного леса) долей площади ветровала от площади леса

Таблица 2.6. Сопоставление расчетной уязвимости лесов с фактическими данными о площади повреждений

Номер класса	Средняя доля площади ветровала от площади леса в классе, %		Фактическая площадь ветровалов, попадающих в данный класс
	расчет	факт	
1	0,27	0,13	592
2	2,67	0,28	3324
3	5,17	0,50	5895
4	7,03	0,38	4721
5	8,80	0,47	5131
6	10,73	0,46	5316
7	12,92	0,51	5873
8	15,67	0,58	6391
9	19,45	0,63	6572
10	26,42	0,88	7912

Для модели, обученной на сбалансированной выборке, показатели точности оказались несколько ниже (R2 = 0,61 по результатам расчета для 100 групп). Основное различие с базовой моделью состоит в том, что самую высокую оценку уязвимости получили смешанные и темнохвойные леса, а для сосновых лесов она значительно ниже. Это объясняется особенностями выборки, а именно малой долей ветровалов в сосновых лесах в ней.

На карте растительности Пермского края представлены характеристики насаждений после прохождения ветровалов, поэтому оценка уязвимости лесов к ветровалам проведена так же по данным продукта GLC-FCS30 (Zhang et al., 2024). Данный продукт содержит информацию о породном составе насаждений за 2000 г. с пространственным разрешением 30 м. Выбор данных за 2000 год обоснован появлением каталога данных спутника Landsat 7 выведенного на орбиту в 1999 г. На карте представлены тематические классы с преобладанием лиственных, смешанных и хвойных лесов. При этом разделение хвойных лесов на светлохвойные и темнохвойные отсутствует. Разделение хвойных лесов на 2 класса проведено с использованием данных, созданной карты растительности Пермского края. На основе данной карты определены районы произрастания светлохвойных лесов и создан бинарный

растр. Далее площади занятые сосновыми лесами удалены из растра хвойных лесов, полученного по данным GLC-FCS30. Таким образом, получены бинарные растры произрастания светлохвойных и темнохвойных лесов.

Результат моделирования уязвимости лесов к ветровалам на основе GLC-FCS30 представлен в Приложении 5. Наиболее высокая степень уязвимости лесов наблюдается в северо-западных и восточных районах распространения хвойных и смешанных насаждений. Среднее значение ожидаемой доли площади ветровала при равномерном ветровом воздействии составляет 16,3%, что на 5,2% выше ожидаемой доли площади ветровала, полученной по авторской карте растительного покрова Пермского края.

При визуальном сравнении результатов оценки уязвимости, полученных по данным созданной карты растительности и по данным GLC-FCS30 за 2000 год, выявляются незначительные расхождения в пространственном распределении. Районам распространения сосновых лесов на северо-западе и в центральной части края по данным за 2000 год соответствует более низкая степень уязвимости, чем по данным, полученным по карте растительности Пермского края. При этом по полученным за 2000 год данным, более обширные площади лесов на северо-востоке края и в центральной его части (районе распространения темнохвойных) получили высокую оценку уязвимости. Такие различия могут быть связаны с сокращением темнохвойных лесов в связи с активной лесозаготовкой.

Оценка точности результата моделирования проведена путем сравнения ожидаемой и фактической доли площади ветровала. Для количественной оценки проведено агрегирование данных на 100 и 10 классов методом квантилей. При классификации данных на 100 групп, равных выявлена умеренная корреляция (R^2 = 0,27) что ниже корреляции, выявленной для данных, полученных по карте растительности Пермского края (R^2 = 0,67) (рис. 2.12а). При этом на графике хорошо выделяются точки с максимальной ожидаемой долей площади и низкой фактической долей площади ветровала. Такое расхождение фактической и ожидаемой площади

ветровалов связано с тем, что фактическое распределение ветровалов по территории края неравномерно. При классификации данных на 10 групп данный эффект сглаживается и прослеживается сильная корреляция (R^2 = 0,64) ожидаемой и фактической доли площади ветровала (рис. 2.12б).

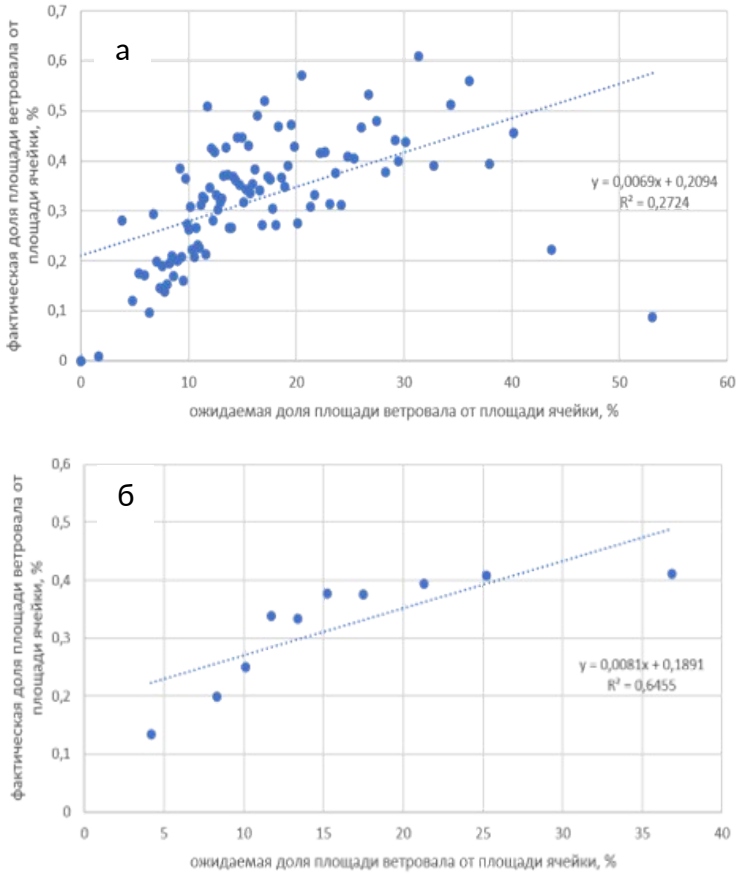


Рис. 2.12. Зависимость фактической и расчетной (на основе карты растительности GLC-FCS30) площади ветровала при агрегировании данных на 100 групп (а) и на 10 групп (б)

Оценка точности результатов моделирования выполнена также на примере крупного ветровала, произошедшего на территории Пермского края 28 мая 2026 г. (рис. 2.13), т.е. уже после получения результатов оценки уязвимости. Ветровал стал крупнейшим в Пермском крае с 18.07.2012 г., а общая протяженность полосы повреждений леса превышала 400 км (Смерчи в лесной зоне России, 2025). Для оценки соответствия расчетной уязвимости лесов и фактического распределения ветровалов по площади были выделены 7 участков, подвергшихся воздействию шквала (где зафиксирован вывал леса). Контуры каждого участка были выделены минимальным

ограничивающим многоугольником (рис. 2.13). В пределах каждого из этих многоугольников были выбраны соответствующие ячейки расчетной сетки 1×1 км, использованные при построении карт уязвимости лесов (Прил. 4-5). Исключены ячейки с долей площади леса менее 25%. Были сопоставлены расчетная уязвимость (доля площади ветровала) и фактическая доля площади ветровала в ячейках от шквала 28 мая. В среднем для всех участков выявлена слабая, но статистически значимая корреляция Спирмена (R = 0,14).

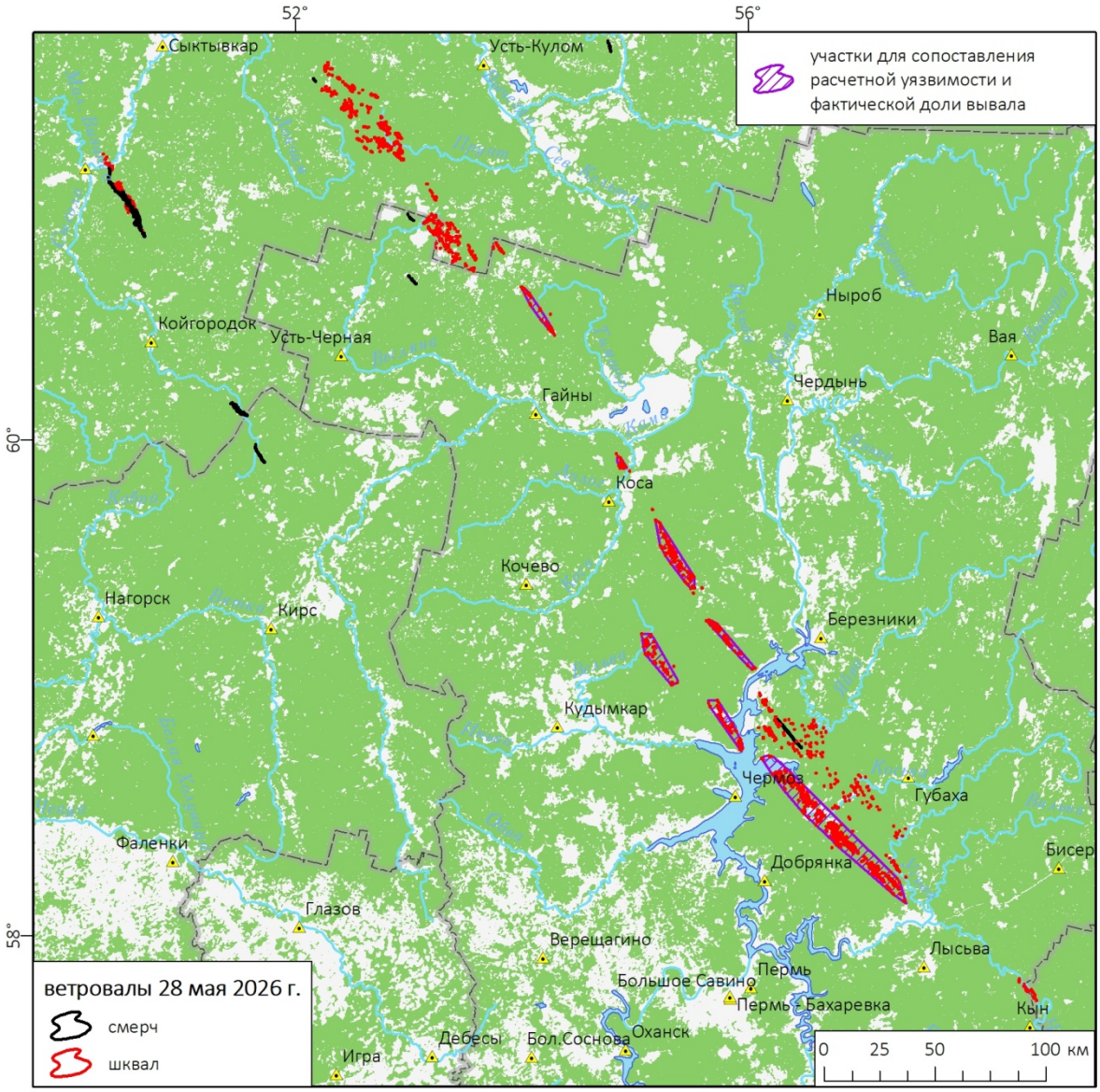


Рис. 2.13. Ветровалы в Пермском крае 28.05.2026 г. и выделенные участки, для которых оценивалось соответствие расчетной уязвимости и фактической доли площади вывала

Такое низкое значение R обусловлено проблемой генерализации данных. В одну ячейку размером 1×1 км попадают разные типы леса (по

породному составу, возрасту, запасу), и оценка уязвимости формируется в результате осреднения их характеристик по площади. Но на более детальном масштабе (рис. 2.14) видно, что ветровалу в основном подверглись участки с доминированием темнохвойных пород и сосны, сохранившиеся в водоохранных зонах. Это также подтверждается проведенной на одном из участков ветровала съемкой с БПЛА. Площадь таких участков на данной территории невелика, и они занимают обычно лишь незначительную часть ячеек расчетной сетки. Уязвимость лесов к ветровому воздействию, рассчитанная по той же методике, но на более детальной сетке, будет иметь более высокую корреляцию с фактическим распределением ветровалов, чем результаты обзорного картографирования (Прил. 4-5). Вторым фактором, снижающим величину корреляции, являются локальные различия в интенсивности ветрового воздействия в пределах участков, которые не учтены при расчете уязвимости (аналогично рис. 2.10).

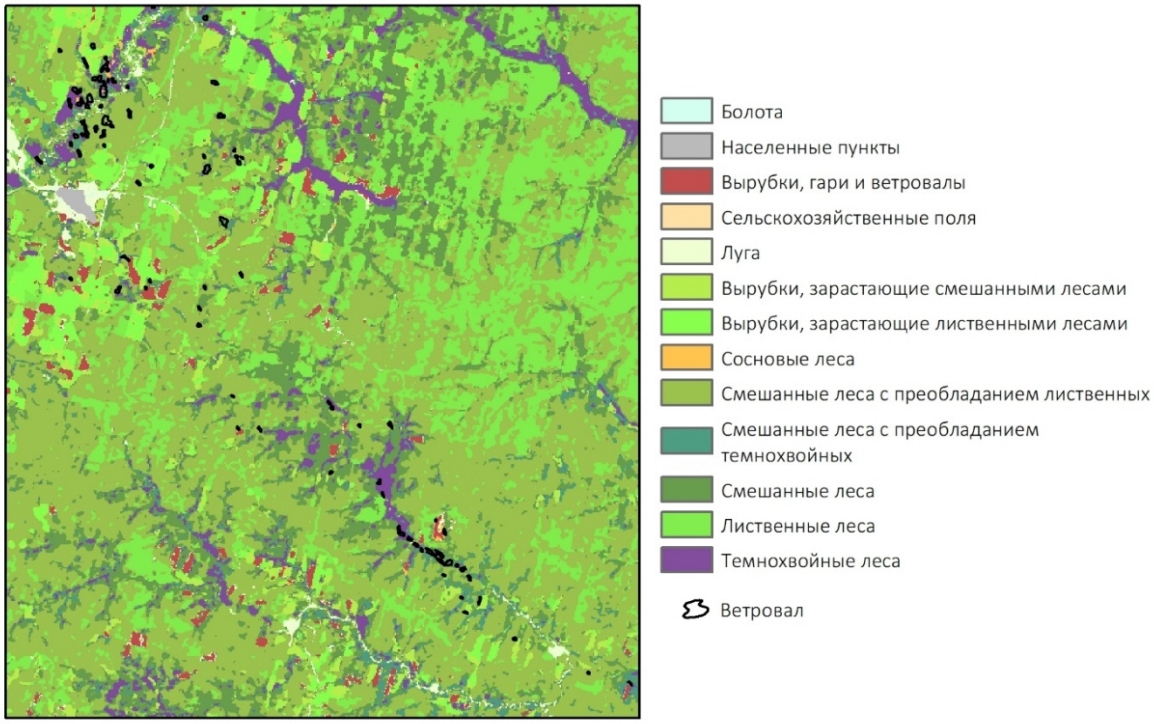


Рис. 2.14. Один из участков ветровала 28.05.2026 на фрагменте Карты растительности Пермского края (Шихов, Семакина, 2022).

2.4. Типизация лесов Пермского края по условиям возникновения ветровалов

Леса России существенно различаются как по природным, так и по хозяйственным характеристикам. Поэтому типизация лесов, выделение территорий с особыми условиями и свойствами, остаётся важной задачей. Разделение лесов по степени их уязвимости к различным воздействиям и по факторам риска нарушения лесного покрова необходимо для эффективного управления лесными ресурсами и принятия обоснованных решений в сфере лесного хозяйства. В связи с этим типизация проводится с учётом множества факторов, определяющих риск возникновения лесных пожаров (Ольховка, Залесов, 2013; Ишутин, 2005; Парамонов, Терехов, 2008) и массового распространения насекомых-вредителей (Волкова, Мельник, 2023). Подобные исследования были выполнены на территории различных субъектов Российской Федерации. Такой подход позволяет выделять зоны с разной степенью опасности и разрабатывать целевые меры по защите лесов в зависимости от специфики региона.

Типизация лесов может выполняться на основе различных признаков (Шейнгауз и др., 1980). Типизация по условиям возникновения ветровалов позволяет учитывать основные факторы и особенности насаждений для прогнозирования и минимизации ущерба от воздействия сильных ветров, своевременно выявлять участки наибольшей уязвимости к ветровалам и планировать защитные мероприятия. На основе типизации лесов формируются рекомендации по лесозаготовке, лесовосстановлению, созданию защитных полос.

Проведенная оценка значимости факторов уязвимости лесов к ветровалам в процессе построения карт уязвимости, а также на основе литературных источников указывает на то, что среди факторов, влияющих на уязвимость лесов к ветровалам, определяющими являются характеристики насаждений, а именно преобладающая порода и возраст древостоя. В связи с этим в качестве основных факторов определены преобладающая порода, возраст древостоя и степень уязвимости к ветровалам.

Типизация территории может осуществляться как экспертным путем, так и с применением автоматизированных методов. Типизация осуществляется на стыке классических методов (типология, наложение), многомерной статистики (кластер-анализ, шкалирование) и современных ГИС-технологий. Это позволяет учитывать множество взаимосвязанных факторов, выделять однородные районы и принимать обоснованные управленческие решения (Зибров и др, 2010). Среди таких методов выделяют метод ведущего фактора, который позволяет выделять районы на основе доминирующего природного или хозяйственного признака, который определяет остальные характеристики территории. И метод наложения (оверлей) схем покомпонентного районирования (многофакторный анализ) — последовательное сопоставление и наложение тематических карт (геоморфологических, почвенных, растительных и др.) для выделения комплексных районов.

Среди методов многофакторного анализа наиболее распространёнными методами являются регрессионный и кластерный анализ (Топоров и др, 2019). При кластеризации объекты исследования распределяются по типам так, чтобы различия внутри каждого типа были минимальны, а различия между типами — максимальны (Бузим и др, 2007). Среди методов кластерного анализа используют плоскую кластеризацию, при которой объекты разделяются на кластеры сразу и при этом объект может относиться только к одному кластеру, либо методы нисходящей/восходящей кластеризации, которые допускают наличие подкластеров.

Создание карты типизации лесов Пермского края по условиям возникновения ветровалов проводилось в несколько этапов. На территорию края была построена расчетная сетка с размером ячейки 5000 м. На основе карты растительности Пермского края сформированы растровые слои, которые содержат в себе информацию о преобладающей породе и возрасте древостоя. Таким образом, лесной покров края был представлен следующими классами: темнохвойные, сосновые, смешанные и лиственные леса возрастом

от 35-40 лет, и аналогичные классы возрастом менее 35-40 лет. Для каждой ячейки сетки рассчитана доля площади, занятая представленным классами и на основе полученных результатов определен преобладающий класс. В качестве дополнительного параметра также рассчитана доля лесопокрытой площади от площади ячейки сетки.

На основе ранее полученных результатов для каждой ячейки также рассчитано среднее значение степени уязвимости лесов к ветровалам. Полученные значения уязвимости классифицированы методом квантиля на 3 группы: низкая, средняя и высокая степень уязвимости. Таким образом, был получен слой, содержащий в себе информацию о возрасте насаждений и преобладающей породе, доле лесопокрытой площади и степени уязвимости лесов к ветровалам в границах ячеек расчетной сетки. На основе перечисленных трех атрибутов проведено определение лесов с разными условиями возникновения ветровалов.

Типизация лесов с разными условиями возникновения ветровалов проводилось в ГИС SAGA с помощью инструмента кластерного анализа с пространственными ограничениями (Cluster Analysis (Table Fields)). Ключевым параметром данного инструмента является метод кластеризации, их в данном инструменте представлено три: Hill-Climbing (Rubin, 1967) метод кластеризации позволяющий решить проблемы таксономии в биологии, Iterative Minimum Distance (Forgy, 1965) метод кластеризации основанный на минимизации среднего квадрата расстояния между точками данных и центрами кластеров и метод Combined Minimum Distance/Hill-Climbing, который сочетает в себе оба подхода. В данной работе использовался метод Iterative Minimum Distance. С использованием данного инструмента проведена кластеризация на разное количество классов. Наиболее оптимальным был принят вариант с 10 кластерами. В результате был получен точечный слой центроидов классифицированных на 10 классов.

Типизация лесов проводилась по преобладающим классам. Так как некоторые классы, полученного в результате кластеризации точечного слоя,

представлены всего несколькими объектами они были исключены из анализа. В результате были выделены границы 5 основных типов с разными условиями формирования ветровалов, которые включают в себя участки преобладания лиственных, смешанных и темнохвойных лесов разной степени уязвимости к ветровалам. Для полученных типов лесов проведен расчет доли площади занятой разными преобладающими породами, а также среднего значения уязвимости лесов к ветровалам (табл 2.7.). В таблице тип 1 – участки преобладания лиственных лесов (возрастом менее 35-40 лет) низкой степени уязвимости, тип 2 – участки преобладания смешанных лесов (возраст от 35-40 лет) низкой степени уязвимости, тип 3 – участки преобладания смешанных лесов (возраст от 35-40 лет) средней степени уязвимости, тип 4 – участки преобладания смешанных лесов (возраст от 35-40 лет) высокой степени уязвимости, тип 5 – участки преобладания темнохвойных лесов (возраст от 35-40 лет) высокой степени уязвимости. Полученные результаты типизации лесов Пермского края представлены на карте (приложение 6).

Таблица 2.7. Доля лесов разных преобладающих пород от площади выделенных типов леса

Преобладающая порода	Возраст насаждения	Доля от лесопокрытой площади района				
		Тип 1	Тип 2	Тип 3	Тип 4	Тип 5
Темнохвойные леса	От 35-40 лет	5,0	10,0	7,1	3,2	48,3
Сосновые леса		1,5	12,0	1,3	1,9	2,8
Смешанные леса		42,7	62,9	62,3	62,3	39,6
Лиственные леса		5,6	5,3	17,4	8,1	2,3
Темнохвойные леса	Менее 35-40 лет	7,1	0,8	0,5	3,8	0,2
Смешанные леса		2,5	3,7	3,7	4,7	3,3
Лиственные леса		35,7	5,3	7,8	16,0	3,6

Проведено визуальное сравнение полученных результатов с лесорастительным районированием, представленным в Лесном плане Пермского края (Лесной план Пермского края на 2018-2027 гг), а также с данными ботанико-географического районирования Пермской области

(Овеснов, 2000). Классы с низкой степенью уязвимости к ветровалам и преобладанием лиственных и смешанных лесов широко представлены на юге Пермского края, где по данным лесорастительного районирования выделяется район хвойно-широколиственных (смешанных) лесов европейской части РФ. По данным ботанико-географического районирования данный район определяется как широколиственно-елово-пихтовые леса. Территории островной Кунгурской лесостепи соответствует район преобладания лиственных лесов с низкой степенью уязвимости.

Центральная часть края по данным типизации лесов характеризуется преобладанием смешанных лесов с низкой и средней степенью уязвимости к ветровалам. Данная территория соответствует южно-таежному лесорастительному району, в котором основным типом растительности являются елово-пихтовые леса с примесью березы и осины. По данным ботанико-географического районирования она относится к району произрастания южнотаежных пихтово-еловых лесов.

На северо-западе края наиболее широко представлены смешанные леса с высокой уязвимостью к ветровалам. Также в данной части края представлен небольшой район преобладания темнохвойных лесов с высокой степенью уязвимости и район преобладания смешанных лесов с низкой степенью уязвимости, который соответствует зонам активной лесозаготовки. Данная территория относится к Западно-Уральскому таежному лесорастительному району и характеризуется широким распространением пихтово-еловых, сосновых и мелколиственных лесов.

На востоке Пермского края широко представлены территории с высокой уязвимостью к ветровалам и преобладанием темнохвойных и смешанных лесов. Данный район относится к Средне-Уральскому таежному лесорастительному району, который отличается выраженной вертикальной поясностью и в основном представлен еловыми лесами с участием березы и осины. По данным ботанико-географического районирования на данной территории представлен район средне- и южнотаежных предгорных пихтово-

еловых и елово-пихтовых лесов. А на северо-востоке район северо- и среднетаежных кедрово-еловых горных лесов, который соответствует району высокой степени уязвимости с преобладанием темнохвойных лесов.

Лесохозяйственные мероприятия по снижению риска ветровалов

Для сокращения ущерба от воздействия сильных ветров необходимо предпринимать ряд мероприятий, направленных на снижение риска ветровалов. В первую очередь данные мероприятия касаются участков, получивших высокую оценку риска ветровалов. Управление лесами включает в себя мероприятия по охране и защите лесов, по уходу за лесами, лесозаготовку, лесовосстановление и другие. На участках с высоким риском ветровалов необходимо учитывать рекомендации, предложенные в работах (Quine et al., 1995; Hahn et al., 2021, Ikonen et al., 2020, Dhubháin et al., 2018) и реализуемые в лесном хозяйстве в ряде стран Европы.

Мероприятия при проведении лесовосстановительных работ

- При подготовке к лесовосстановлению учитывается механический состав грунта. На каменистых, скелетных или уплотненных участках, где глубина укоренения ограничена, отдают предпочтение локальному окучиванию или поверхностному культивированию, чтобы не подрезать потенциальную корневую систему.
- На переувлажненных почвах глубину борозд при необходимости вспашки сокращают до минимума для предотвращения застоя воды в зоне формирования корней.
- На переувлажненных участках предварительно проводится осушение (прокладка дренажных каналов, строительство водоотводов), так как избыток влаги ведет к развитию поверхностной корневой системы, которая не способна обеспечить дереву необходимую якорную устойчивость.
- Исключаются монокультурные насаждения, отдается предпочтение смешанным древостоям из разных пород деревьев с разной степенью уязвимости к ветру. Разная структура крон и корневых систем создает механическую взаимоподдержку внутри насаждения.

- На участках лесовосстановления рекомендуется увеличивать шаг посадки деревьев вблизи края, или провести кронирование нижних ветвей у краевых деревьев. Это повышает продуваемость насаждения, снижая общее давление ветра на полог за счет частичного пропускания потока сквозь него.
- По возможности отдается предпочтение естественному лесовосстановлению, так как самосевные деревья формируют более глубокую и адаптированную к местным условиям корневую систему.
- На участках высокого риск при лесовосстановлении не используются минеральные удобрения, так как усиленный рост хвои и ветвей резко увеличивает парусность дерева.

Мероприятия при проведении лесозаготовки

- На участках с высоким риском ветровалов не проводятся сплошные рубки, а отдается предпочтение выборочным регулярным рубкам с частотой раз в 15–20 лет и умеренной долей изъятия. Рекомендуется избегать создания крупных прогалин в пологе леса, так как деревья на границе таких пустот подвергаются повышенной ветровой нагрузке.
- При выборочной рубке из насаждения удаляются ослабленные, больные и поврежденные деревья, а здоровые деревья играют роль естественного защитного каркаса. Формирование разновозрастных и смешанных насаждений обеспечивает многоуровневую защиту.
- С наветренной стороны при выборочной рубке сохраняют непрореженные буферные полосы шириной не менее высоты основного древостоя.

При необходимости проведения сплошной рубки на участках с высоким риском учитываются следующие рекомендации (Potterf et al., 2023, Dhubháin et al., 2018, Quine et al., 1995):

- Ограничивается ширина лесосеки, она должна быть равна высоте прилегающего сохраняемого древостоя. Это предотвратит резкое изменение микроклимата на кромке леса.

- Протяженность вновь создаваемых открытых границ минимизируется, лесосеки должны иметь минимальный периметр. Они должны быть расположены так, чтобы господствующие ветра не были направлены в угол насаждения. Выступающие углы принимают на себя большую нагрузку из-за концентрации воздушных потоков.
- Одна крупная лесосека простой геометрической формы предпочтительнее множества мелких участков той же общей площади, а также участка сложной формы с изрезанным периметром.

2.5. Оценка комплексного воздействия ветровалов и других видов нарушений лесного покрова

Ветровалы связаны с другими факторами нарушения лесного покрова и комплексно воздействуют на насаждения. Участки, подвергшиеся ветровалу, характеризуются большим количеством валежа. Таким образом, увеличивается пожароопасность за счет существенного увеличения количества легковоспламеняемого материала (Лескинен и др., 2020). Поврежденные ветром деревья также более подвержены поражению грибковыми инфекциями, что приводит к ухудшению состояния древостоя и может привести к последующему усыханию. Захламленные деревьями участки и поврежденные деревья создают благоприятные условия для возникновения и распространения очагов насекомых-ксилофагов (Скворцова и др., 1983). В исследовании (Крылов и др., 2011) отмечается связь массового размножения короеда-типографа в 2010 году с аномальной засухой и большим объемом ветровальной древесины.

Выделение участков усыхания по спутниковым снимкам основано на различиях спектральных свойств поврежденных и здоровых деревьев. Концентрация хлорофилла в листьях снижается в усыхающих насаждениях, что приводит к снижению поглощения солнечного излучения в видимом диапазоне. Также в листве поврежденных деревьев снижается содержание влаги, и это приводит к повышению отражательной способности в среднем

ИК диапазоне (Алексеев, Черниховский, 2024). На этих спектральных свойствах растительности основан ряд вегетационных индексов. Однако отмечается, что на точность выделения участков усыхания в большей степени влияют местные условия, и в меньшей степени − выбор вегетационного индекса (Киселев и др., 2025).

По разновременным спутниковым данным Landsat проведена оценка усыхания участков, примыкающих к ветровалам. Для выделения участков усыхания рассчитан вегетационный индекс SWVI, который позволяет выделять участки насаждений, находящихся в угнетенном состоянии, а также участки гибели насаждений. Средняя ИК область спектра отражает изменения влагосодержания растения, а также изменения структуры полога насаждения и структуры листьев, в то время как отражение в ближнем ИК диапазоне спектра зависит от внутренней структуры листа и не зависит от насыщенности его влагой (Алексеев, Черниховский, 2024). В работе (Крылов и др., 2011) индекс SWVI обеспечил более высокую точность выделения участков повреждения насаждений в сравнении с индексом NDVI.

Оценка проведена по трем крупным ветровалам с наибольшей площадью повреждений, произошедших на севере Пермского края в районах распространения темнохвойных и сосновых лесов (табл. 2.8.). Индекс SWVI был рассчитан для снимков, полученных сразу после ветровала и последних доступных безоблачных снимков Landsat. Интервал между датами съемки составил около 10 лет.

Для выявления усыхающих участков проведен расчет разности SWVI между 2014 и 2024 гг. Для сравнения распределения значений разности индекса в непосредственной близости от ветровала и на некотором удалении от него, были создано две буферные зоны вокруг ветровалов. Первая зона – это участки, примыкающие непосредственно к ветровалу (до 200 м), вторая – находящиеся на некотором удалении (200-500 м). В границах буферных зон построены сетки с размером ячейки 100 м и рассчитано среднее значение разности SWVI в каждой ячейке. На основе полученных результатов оценено

распределение значений (рис. 2.15.) и оценена значимость межгрупповых различий по тесту Колмогорова-Смирнова для двух независимых групп. На рисунке представлены графики распределения значений индекса для ветровалов, произошедших в Гайнском и Красновишерском районах.



Рис. 2.15. Разность SWVI в границах: 1 – внешнего буфера, 2 – внутреннего буфера

Полученные распределения (рис. 2.15) демонстрируют расхождение средних значений индекса в границах внутреннего и внешнего буфера. Согласно тесту Колмогорова-Смирнова, разность SWVI во внутреннем буфере, то есть в непосредственной близости от ветровала статистически значимо больше, чем во внешнем буфере. Таким образом, можно сделать вывод, что в непосредственной близости от ветровалов наблюдается более сильное снижение индекса SWVI, которое может указывать на усыхание деревьев. Но при этом выявить массовые очаги усыхания, как в работах (Крылов, Владимирова, 2011, Крылов и др., 2011) не удалось. Снижение значений индекса может быть связано с усыханием отдельных деревьев, что объясняется преобладанием в непосредственной близости к ветровалу хвойных пород, которые более подвержены усыханию.

Таблица 2.8. Общая характеристика рассматриваемых данных для выделения участков усыхания

Дата ветровала	Муниципальный район	Площадь ветровала, га	Дата снимка, полученного после ветровала	Дата снимка, полученного за текущий период
18.07.2012	Красновишерский	7686,92	23.08.2014	06.07.2024
18.07.2012	Кочевский,	3800,38	01.07.2013	14.07.2024

	Юрлинский			
18.07.2012	Гайнский	5027,78	01.07.2013	14.07.2024

Также проведена оценка комплексного воздействия ветровалов и лесных пожаров. Для оценки использовались сведения о лесных пожарах, собранные из информационной системы дистанционного мониторинга Рослесхоза (ИСДМ) (Природные пожары по данным Рослесхоза, 2026). Они содержат координаты и площади пожаров с 2000 г. Также для оценки использован продукт обработки снимков Landsat Global Forest Loss Due to Fire за период с 2000 г. (Tyukavina et al., 2022). Основное отличие данных источников информации заключается в том, что данные о лесных пожарах Рослесхоза содержат информацию о пройденных огнем площадях, а данные Global Forest Loss Due to Fire − о площади гибели лесов от пожаров.

Оценка доли площади пожаров от площади леса проводилась как в пределах буферной зоны размером 2000 м, построенной вокруг каждого ветровала, так и для всей лесной зоны ЕТР. В границах лесной зоны рассчитана площадь всех пройденных огнем площадей и вычислена доля площади пожаров от площади леса. Данные расчеты проведены для всей лесной зоны ЕТР, а также вблизи ветровалов в пределах буферной зоны (табл. 2.9). Так как в данных ИСДМ Рослесхоз и Global Forest Loss Due to Fire наблюдаются расхождения в площади, пройденной огнем, оценка по двум источникам данных проводилась отдельно. Дополнительно по каждому источнику данных рассчитана доля площади пожаров от разных типов леса. Для определения границ разных типов леса использовалась полученная ранее карта растительности Пермского края.

При сравнении полученных результатов увеличение доли площади пожаров вблизи ветровалов не выявлено. Полученный результат может быть связан с тем, что ветровалы в основном происходят в хвойных и смешанных лесах, а пожарам наиболее подвержены сосновые леса. Таким образом существенное влияние ветровалов на последующее распространение пожаров на этих участках в среднем для лесной зоны ЕТР не выявлено.

Таблица 2.9. Оценка доли площади пожаров от площади леса

Источник данных	Доля площади гарей от площади леса, %				
	общей площади леса	темнохвойных лесов	сосновых лесов	смешанных лесов	лиственных лесов
Global Forest Loss Due to Fire	В пределах лесной зоны ЕТР				
	0,33	0,16	0,53	0,17	0,37
	В границах буферной зоны				
	0,52	0,26	0,67	0,47	0,52
Данные ИСДМ Рослесхоз	В пределах лесной зоны ЕТР				
	1,00	0,22	0,52	1,95	1,00
	В границах буферной зоны				
	0,78	0,14	0,46	2,19	0,82

2.6. Выводы по главе 2

Результатом проведенного исследования стало создание новой карты растительности и карты оценки уязвимости лесов к ветровалам Пермского края. Новая карта растительности с пространственным разрешением 30 м, созданная на основе классификации спутниковых снимков Landsat, на сегодняшний день не имеет аналогов. Использование дополнительных материалов (в частности, данных о нарушениях лесного покрова, а также об участках лесовосстановления на сельскохозяйственных угодьях) обеспечило достаточно высокую тематическую детальность созданной карты. Карта содержит 19 тематических классов, 11 из них включают информацию о лесной растительности. Выполненная оценка точности выделения тематических классов с использованием данных карты растительности России, а также материалов лесоустроительных работ показала неоднозначные результаты. Наибольшая точность выделения характерна для темнохвойных и сосновых лесов (по данным карты растительности России − около 70%, а по материалам лесоустройства – около 75%). Класс лиственных лесов выделен с минимальной точностью, поскольку его площадь сильно варьируется по разным данным, а в результатах классификации они частично отнесены к классу смешанных лесов с преобладанием лиственных пород.

В результате исследования создана модель оценки уязвимости лесов к ветровалам с использованием полученной карты растительности. Основным преимуществом модели является то, что все 16 предикторов оценивались на основе общедоступных спутниковых данных и продуктов их обработки, а обучение проводилось на основе данных о ветровалах, которые произошли в разных регионах лесной зоны ЕТР. Это позволяет использовать данную модель для оценки уязвимости лесов не только в Пермском крае, но и в других регионах с похожими характеристиками насаждений, прежде всего в лесной зоне ЕТР. Модель не позволяет корректно оценить пространственное распределение повреждения леса ветровалом на локальном уровне (для отдельного ветровала), поскольку не учитывает характерную для случаев шквалов сильную неоднородность скорости ветра в пространстве. Однако на региональном уровне для Пермского края в целом получена оценка, которая хорошо согласуется с фактическим распределением ветровалов за последние 40 лет (с учетом редкости данных событий).

Наиболее значимыми факторами, определяющими уязвимость лесов к ветровалам, являются характеристики насаждения, а именно преобладающая порода, высота и запас древесины.

Важно отметить, что полученный результат для Пермского края не может рассматриваться как оценка риска, поскольку не учитывает распределение по территории штормовых событий, вызывающих ветровалы. Оценка реального распределения по территории штормовых событий представляет собой отдельную задачу, поскольку эти события (в основном шквалы и смерчи) имеют локальную природу и в большинстве случаев не фиксируются метеостанциями. Для территории края такая оценка ранее была получена в работе (Shikhov et al., 2021), но она требует существенной актуализации и в настоящей работе не использовалась. Важным источником ошибок являются и неоднородности пространственного распределения ветрового воздействия (скорости ветра и интенсивности осадков при шквалах) на участках ветровалов, которые использовались для обучения. Эти

неоднородности обусловлены самой природой конвективных явлений, и возможность уменьшить их влияние ограничена по причине отсутствия каких-либо измерений, помимо данных сети метеостанций. Помимо этого, можно выделить следующие ограничения полученного результата.

- Почти все ветровалы в Пермском крае произошли еще до получения снимков, использованных для создания карты растительности (Шихов, Семакина, 2022). В результате в ячейках сетки, в которых наблюдались ветровалы, представлены характеристики лесного покрова уже после ветровала. Это может быть одной из причин слабой корреляции между расчетной и фактической площадью ветровалов, рассчитанной по исходной выборке.
- По причине отсутствия данных с необходимым пространственным разрешением не рассматривались некоторые переменные, которые могут существенно влиять на уязвимость лесов к воздействию ветра, в частности мощность почвенного профиля.
- При дальнейшем расширении обучающей выборки возможно некоторое улучшение ее репрезентативности, и как следствие – качества прогнозирования с помощью модели Random Forest Regressor или иных методов машинного обучения.

ГЛАВА 3. ОБЗОРНОЕ КАРТОГРАФИРОВАНИЕ РИСКА ВЕТРОВАЛОВ НА ЕВРОПЕЙСКОЙ ТЕРРИТОРИИ РОССИИ

Создание карт риска ветровалов является актуальной задачей для исследователей в разных странах мира. Карты риска создаются как для отдельных регионов (Pawlik et al. 2022) так и для целых стран (Suvanto et al. 2019). Для территории России оценки риска ветровалов на уровне всей страны или крупных регионов ранее не производились, хотя факторы, определяющие уязвимость лесов к ветровому воздействию хорошо изучены. Актуальность обзорного (мелкомасштабного) картографирования риска ветровалов, как и других природных причин гибели лесов (пожаров, вспышек численности насекомых-вредителей) растет в связи с изменением климата и разработкой планов адаптации к нему на уровне регионов, которые затрагивают и адаптацию лесного хозяйства.

3.1. Формирование базы данных предикторов для оценки риска

На основе анализа научной литературы был сформирован перечень предикторов для оценки составляющих риска ветровалов (опасности, подверженности и уязвимости), который приведен в табл. 3.1. Значения всех предикторов были извлечены из перечисленных наборов данных (табл. 3.1.) и осреднены в ячейках размером 5000×5000 м. Выбор такого размера ячейки для выполнения расчетов обусловлен соблюдением баланса между вычислительными ресурсами и детальностью данных. При этом используемые данные о предикторах имеют пространственное разрешение от 30 м (данные Global Forest Change о нарушениях лесного покрова) до 0,25˚ (показатели, рассчитанные по данным реанализа ERA5). Все предикторы были приведены в числовой вид (данные о преобладающих лесообразующих породах представлены в виде доли площади ячеек расчетной сетки, занятой той или иной породой). Прочие характеристики были осреднены по площади расчетных ячеек. Данные были представлены в виде таблицы, где каждой

ячейке сетки соответствовали 26 значений предикторов и значение предиктанта. Они были использованы как обучающая выборка для оценки риска ветровалов на основе метода случайного леса.

Таблица 3.1. Перечень предикторов и источники данных

Переменная	Размер ячейки	Источник данных и способ получения
Предикторы опасности (частоты и интенсивности штормовых событий)		
Повторяемость случаев с порывами ветра ≥ 25 м/с в теплый период года (апрель - октябрь), случаев/10 лет	1000	Данные реперных метеостанций Росгидромета (Булыгина и др., 2014)
Среднегодовой максимум скорости ветра в теплый период года, м/с	0,25˚	Данные реанализа ERA5 (Hersbach et al., 2020)
Средняя плотность молниевых разрядов (случаев в день на 1000 км) в летние месяцы за 2011-2020 гг.	1000	Данные о плотности молний за 2010-2024 гг. (Kaplan and Lau, 2021)
Повторяемость закритических значений композитного параметра суперячеек SCP и параметра значительного торнадо STP за летние месяцы 2011-2020 гг. (ч/год)	0,25˚	Массив данных значений конвективных параметров для территории Северной Евразии на основе реанализа ERA5 (Chernokulsky et al., 2022)
Предикторы подверженности (распространенность реципиента риска)		
Доля площади леса от площади ячейки, %	230	Карта растительности России, созданная по спутниковым данным MODIS (Барталев и др., 2016)
Предикторы уязвимости (характеристики лесных насаждений и факторы местоположения, определяющие предрасположенность лесов к воздействию ветра)		
Доля площади темнохвойных лесов (возраст от 35-40 лет), % от площади ячейки	230	Карта растительности России, созданная по спутниковым данным MODIS (Барталев и др., 2016)
Доля площади сосновых лесов (возраст от 35-40 лет), % от площади ячейки		
Доля площади смешанных лесов (возраст от 35-40 лет), % от площади ячейки		
Доля площади лиственных лесов (возраст от 35-40 лет), % от площади ячейки		
Доля площади темнохвойных лесов (возраст менее 35-40 лет), % от площади ячейки		
Доля площади сосновых лесов (возраст менее 35-40 лет), % от площади ячейки		
Доля площади смешанных лесов (возраст		

менее 35-40 лет), % от площади ячейки		
Доля площади лиственных лесов (возраст менее 35-40 лет), % от площади		
Средняя высота древостоя в ячейке, м	30	Global Forest Canopy Height, данные за 2020 г. (Potapov et al., 2021)
Средняя биомасса (запас древесины) в ячейке, $м^3$/га	100	ESA Biomass Climate Change Initiative v. 5.0 (Santoro et al., 2021), данные за 2021 г.
Доля площади свежих вырубок (возраст 10 лет и менее), % от площади ячейки	30	Продукт Global Forest Change (Hansen et al., 2013). Данные за 2010-2023 гг., в зависимости от даты ветровала
Доля площади буферных зон (150 м) вокруг свежих вырубок, % от площади ячейки		
Средний уклон в ячейке, ˚	450	Цифровая модель рельефа GEBCO 2023
Средняя выпуклость склонов (Convexity) в ячейке (безразмерная)		
Доля площади положительных форм рельефа на основе классификации форм рельефа (TPI-Based Landforms Classification), % от площади ячейки		
Средний индекс наветренного и подветренного склона (Wind Effect), % от площади ячейки		
Доля площади, занятой почвами с грубой (песчаной), средней и тяжелой (глинистой) структурой, % от площади ячейки	Вектор-ные данные (М 1: 5000000	Данные DSMW (Digital Soil Map of the World), разработанной продовольственной программой ООН (Sanchez et al., 2009)
Доля площади, занятой горными почвами, % от площади ячейки		

Предикторы опасности (частоты и интенсивности штормовых событий)

Оценка опасности предполагает определение характеристик повторяемости и интенсивности штормовых событий, способных вызвать повреждение лесного покрова. Для территории Западной и Северной Европы эта задача решается на основе данных наземных наблюдений или реанализа (Venäläinen et al. 2020). Они достаточно адекватно описывают повторяемость и силу штормовых ветров, связанных с процессами синоптического масштаба в холодный период года, которые вызывают наиболее масштабные ветровалы в этих странах. Из показателей скорости ветра обычно используют 10-ти летний максимум по каждой метеостанции или в каждой ячейке сетки

реанализа (Laapas et al. 2019, 2023; Venäläinen et al. 2017). Однако для ЕТР, где более 90% площади ветровалов связаны с конвективными шквалами или смерчами, такие данные будут неинформативными. Метеостанции пропускают большинство случаев шквалов и смерчей из-за их локального характера и низкой плотности сети, а в реанализе они не воспроизводятся в явном виде. Другие источники данных, такие как Европейская база данных об опасных явлениях погоды ESWD (Groenemeijer и др., 2017) также не позволяют объективно оценить пространственное распределение, т.к. частота регистрации случаев и ущерба от них сильно зависит от плотности населения. Для оценки пространственного распределения шквалов и смерчей используют косвенные предикторы, такие как многолетние данные о плотности молниевых разрядов, в частности World Global Lightning Climatology (WGLC) на основе сети грозопеленгации WWLLN (Kaplan and Lau, 2021), или прокси-характеристики, рассчитанные на основе данных реанализа (Taszarek et al., 2021).

В рамках настоящей работы были использованы два предиктора, основанных на данных наблюдений – повторяемость случаев очень сильного ветра (≥ 25 м/с) в период апреля по октябрь по данным реперных метеостанций сети Росгидромета за 1985-2023 гг., и средняя плотность молниевых разрядов по данным WGLC за 2010-2024 гг. Использование разных временных периодов обусловлено тем, что данные WGLC доступны только за период с 2010 г.

Расчет повторяемости случаев очень сильного ветра по данным сети реперных метеостанций затрудняется тем, что среднее расстояние между ближайшими станциями составляет 116 км. Многие станции расположены в условиях ветровой защищенности и не отмечали порывы ветра ≥ 25 м/с ни разу за всю историю наблюдений. Всего использованы данные 123 метеостанций, на которых было зафиксировано в общей сложности 216 случаев с порывами ветра ≥ 25 м/с в теплый период. На 39 из 123 станций не было ни одного такого события за рассматриваемый период. Расчет был

выполнен следующим образом: была построена прямоугольная сетка с размером ячейки 300×300 км, в каждой ячейке которой вычислено число попадающих в ячейку метеостанций и суммарное число случаев с ветром ≥ 25 м/с в ячейке, отнесенное к числу метеостанций. Далее из центроидов ячеек сетки выполнена интерполяция методом локальных полиномов (рис. 3.1а). Также по данным реанализа ERA5 с шагом по времени 1 ч был вычислен средний годовой максимум скорости ветра в каждой ячейке сетки реанализа (рис. 3.1б). Как хорошо видно на рисунке, оба показателя снижаются в центральной части лесной зоны, где ветровалы наиболее распространены, что указывает на их малую информативность для оценки риска ветровалов.

Данные WGLC о плотности молниевых вспышек были осреднены за период 2010-2024 гг. Ранее уже была показана высокая корреляция между пространственным распределением молниевой активности и ветровалов (Shikhov et al., 2025), что видно и на рис. 3.1в.

В качестве прокси-характеристик, рассчитанных по данным реанализа ERA5, была рассмотрена повторяемость высоких (закритических) значений нескольких параметров, которые характеризуют степень благоприятности атмосферных условий для развития сильных и долгоживущих конвективных штормов, продуцирующих шквалы и смерчи. Эти параметры характеризуют основные ингредиенты, необходимые для развития глубокой конвекции − конвективную неустойчивость, влагосодержание, сдвиги ветра и завихренность (Taszarek et al., 2020). Шквалы, вызывающие крупные ветровалы, обычно формируются в условиях сочетания сильной неустойчивости воздушной массы (доступная потенциальная энергия неустойчивости ML CAPE > 1000 Дж/кг) и сильного сдвига ветра (векторная разность скорости ветра в слое от земли до 6 км свыше 20 м/с), что установлено как для территории России (Chernokulsky et al., 2022a, 2023; Kalinin et al., 2025), так и для Европы и Северной Америки (Taszarek et al., 2020).

Наиболее информативными для выявления условий возникновения сильных шквалов и смерчей являются так называемые композитные параметры, которые характеризуют различные сочетания неустойчивости, сдвигов ветра и завихренности. К ним относятся композитный параметр суперячеек (SCP), параметр значительного торнадо (STP), параметр крупного града (SHIP), индекс опасной погоды (SWEAT) и параметр WMAXSHEAR, комбинирующий энергию неустойчивости и сдвиг ветра (Taszarek et al., 2020, 2021). Ранее авторами на основе реанализа ERA5 были оценены зависимости между пространственным распределением ветровалов и этих параметров в лесной зоне России за период 1991-2020 гг. (Shikhov et al., 2025). В данной работе в качестве предикторов выбраны два показателя, наиболее тесно коррелирующих с пространственным распределением ветровалов на ЕТР – число дней с закритическими значениями параметров SCP и STP (рис. 3.1. г, д).

Предикторы уязвимости лесов

Согласно (Seidl et al., 2011), среди этих предикторов выделяют характеристики лесных насаждений, факторов местоположения и особенностей лесопользования. Преобладающие лесообразующие породы оценивались по Карте лесов России (Барталев и др., 2016) с пространственным разрешением 230 м, выбор которой был обусловлен ее наибольшей тематической детальностью в сравнении с аналогами. По данной карте были определены 8 показателей доли различных лесообразующих пород, а также вычислена доля лесопокрытой площади в каждой ячейке расчетной сетки.

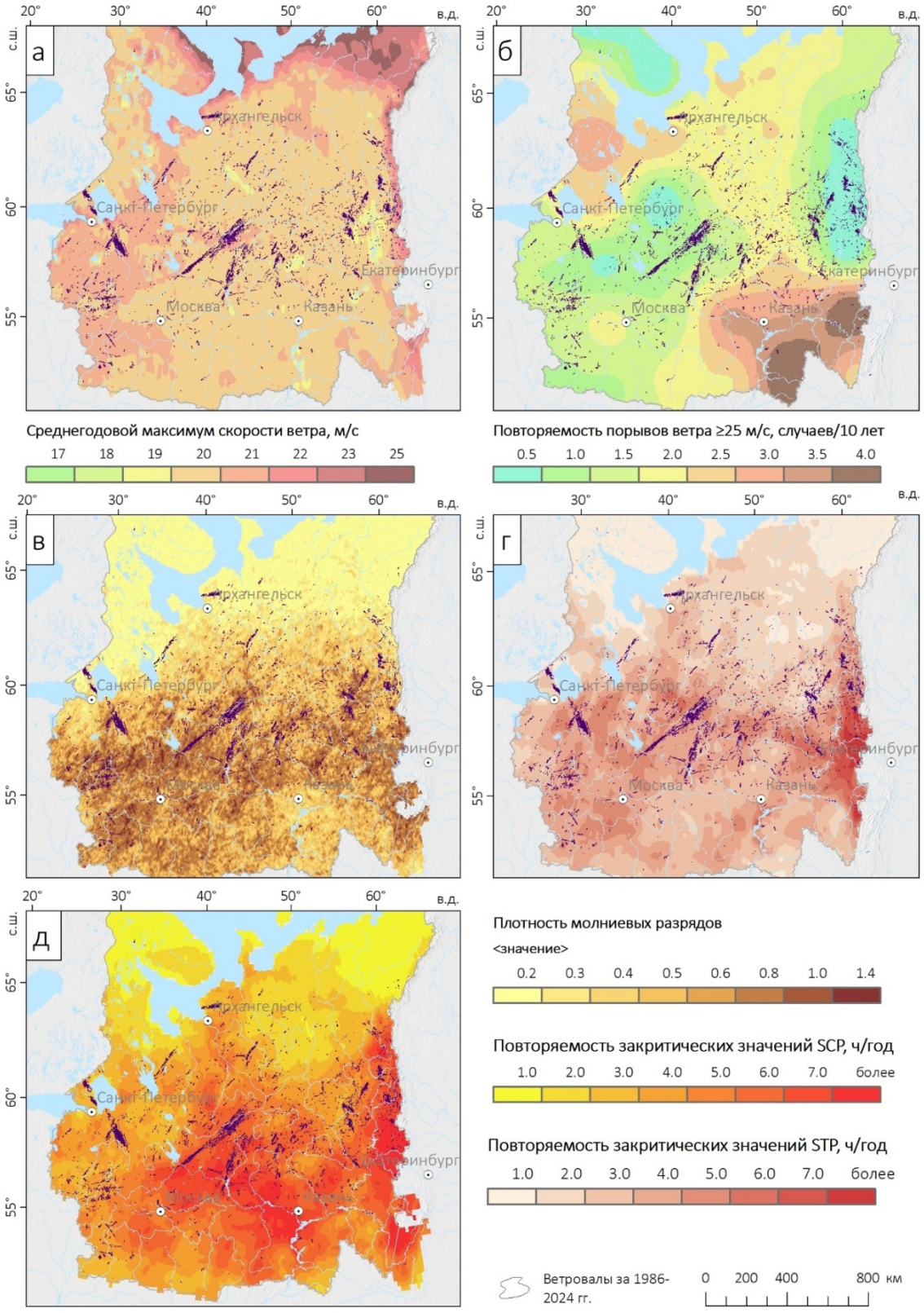


Рис. 3.1. Пространственное распределение предикторов опасности ветровалов: а – среднегодовой максимум скорости ветра по данным реанализа ERA5, б – повторяемость порывов ветра ≥ 25 м/с в теплый период года в лесной зоне, в – плотность молниевых разрядов по данным WWLLN, г – повторяемость закритических значений STP, д – повторяемость закритических значений SCP

Для классификации насаждений по возрасту были использованы данные о нарушениях лесного покрова, зафиксированных на исследуемой территории за 1986-2023 гг. по спутниковым данным Landsat. Они были получены на основе двух тематических продуктов обработки данных Landsat – Global Forest Change (Hansen et al., 2013) за период 2001-2024 гг. и Eastern'Europe Forest Cover Change за период с 1986 по 2000 гг. Рассматривались только нарушения площадью свыше 3 га. Все лесопокрытые участки, попадающие в области этих нарушений возрастом от 10 лет и более (т.е. нарушения 2014 г. и более ранние), были классифицированы как молодняки (с преобладанием лиственных или хвойных пород). Необходимость выделения молодняков обусловлена тем, что они обычно мало подвержены ветровалам (Петухов, 2016; Ulanova, 2000). При использовании такого подхода к молоднякам были отнесены только леса, восстанавливающиеся на участках, где ранее также произрастал лес. Это является серьезным ограничением, так как на ЕТР значительные площади занимают леса на бывших сельхозугодьях (Глушков и др., 2019). Использованный для расчетов фрагмент карты растительности с классификацией лесов по двум классам возраста представлен на рис. 3.2.

Прочие характеристики насаждений включают высоту древостоя и запас древесины, которые оценивались на основе глобальных тематических продуктов (табл. 3.1, рис. 3.3). Также оценено влияние соседства со свежими вырубками на основе отношения доли площади свежих (возрастом до 10 лет) вырубок к общей площади леса в каждой ячейке расчетной сетки. Были построены буферные зоны шириной 150 м вокруг вырубок и рассчитано отношение площади буферных зон к общей площади ячейки.

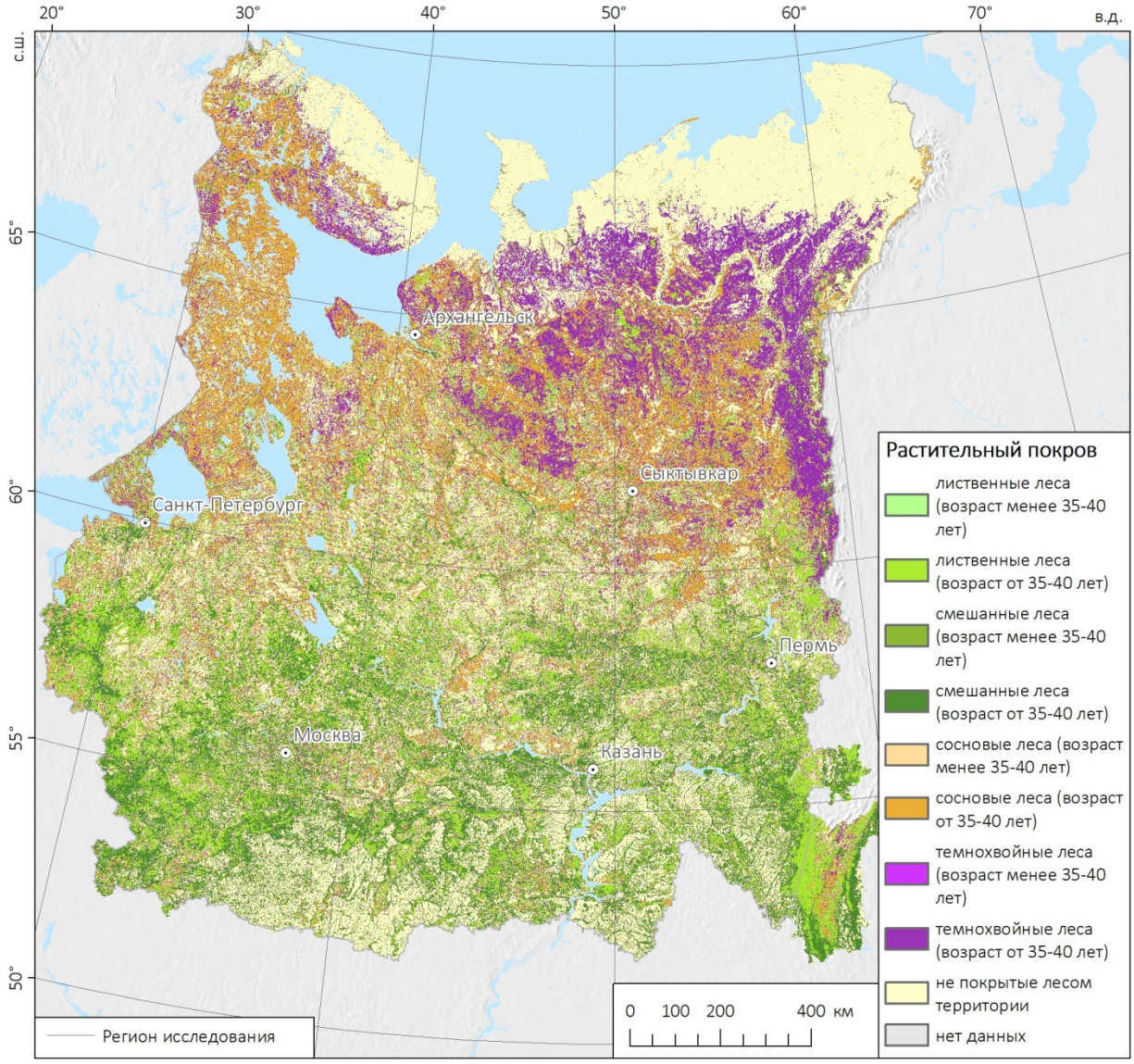


Рис. 3.2. Преобладающие лесообразующие породы и возраст насаждений на основе карты растительности России (Барталев и др., 2016), данных Global Forest Change и Eastern'Europe Forest Cover Change

Для оценки влияния рельефа на характер и степень повреждения древостоя рассчитан ряд морфометрических характеристик по ЦМР GEBCO, пространственное разрешение которой (450 м) оптимально для обзорного картографирования. Характеристики перечислены в табл. 3.1, расчет их выполнен средствами ГИС SAGA (http://www.saga-gis.org/). Среди характеристик рельефа рассмотрены высота местности, уклон, выпуклость склона (Convexity), доля площади положительных форм рельефа на основе классификации форм рельефа и специализированный параметр Wind Effect, характеризующий влияние экспозиции и уклона склона на скорость ветра.

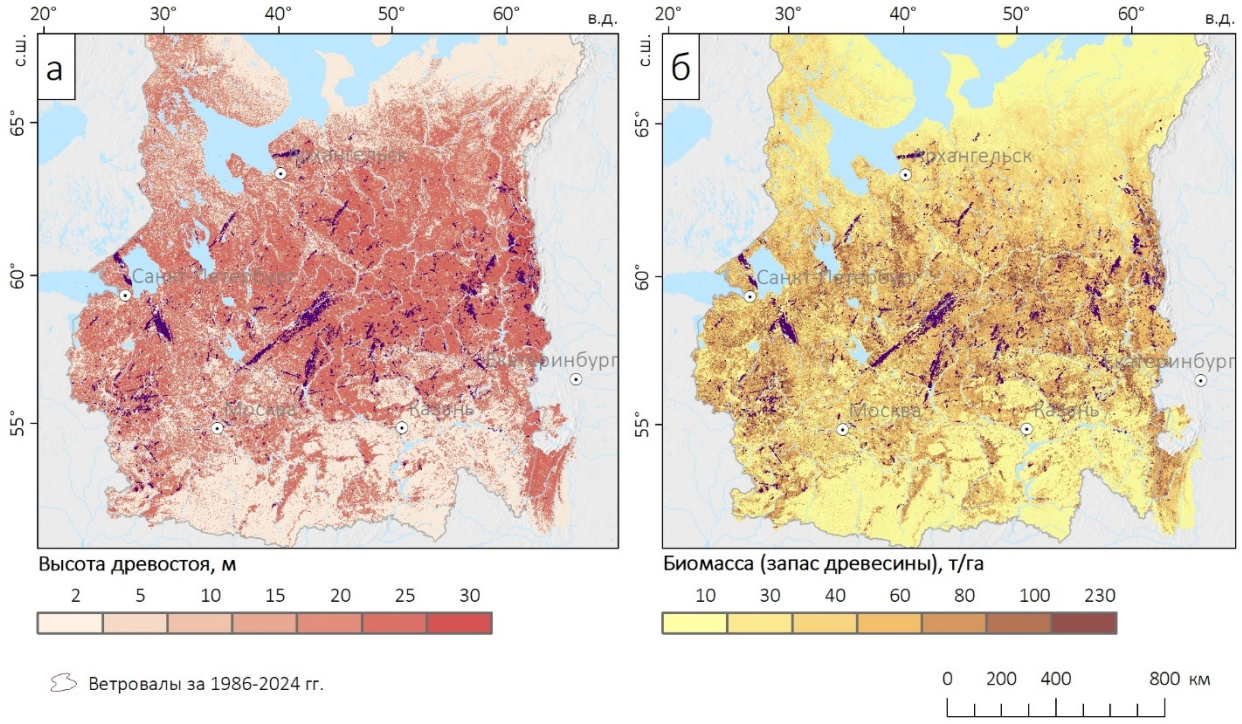


Рис. 3.3 Пространственное распределение независимых переменных: а – высота древостоя, б – запас древесины

Характеристики почвенного покрова, такие как гранулометрический состав и мощность почвенного профиля, существенно влияют на уязвимость лесов к ветровому воздействию. В частности, на песчаных почвах уязвимость лесов выше, чем на глинистых (Suvanto et al., 2019). Для всей ЕТР доступны лишь мелкомасштабные цифровые карты гранулометрического состава почв. В настоящей работе была использована глобальная цифровая карта почв DSMW (Digital Soil Map of the World), разработанная продовольственной программой ООН (ФАО) на основе национальных почвенных карт, в масштабе 1:5 000 000 (Sanchez et al., 2009). В данных DSMW выделены три класса почв по гранулометрическому составу с крупнозернистой (песчаной), средней и мелкозернистой (тяжелой или глинистой) структурой (рис. 3.4). В рамках настоящей работы в каждой ячейке расчетной сетки была определена доля площади, занятая каждым из трех классов почв. Также рассчитана доля площади, занятой горными почвами, которые часто характеризуются укороченным профилем, и произрастающие на них леса также отличаются повышенной уязвимостью к ветровой нагрузке (Suvanto et al., 2019).

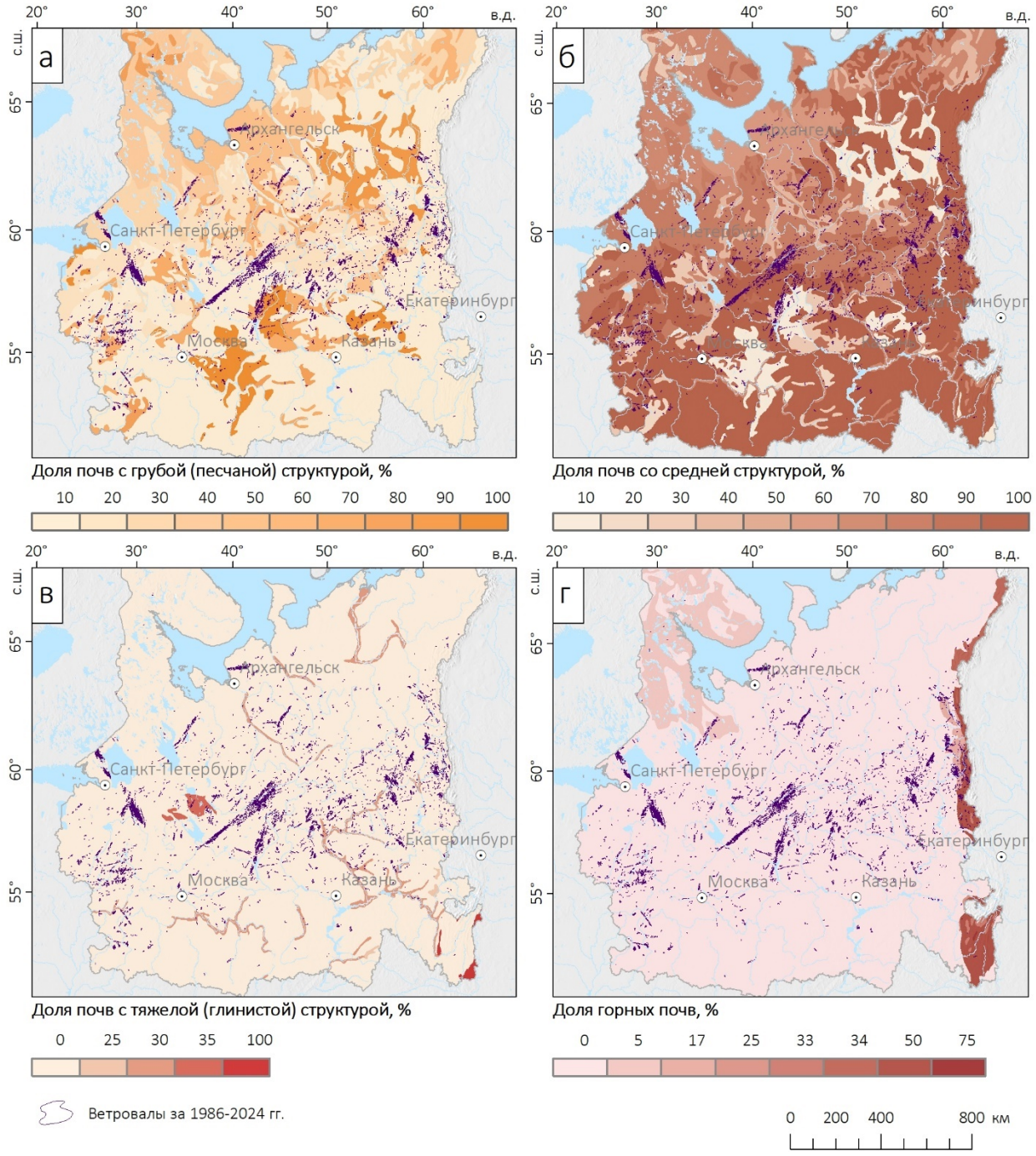


Рис. 3.4 Пространственное распределение характеристик почвенного покрова по данным DMSW (Sanchez et al., 2009): а – крупнозернистая (песчаная) структура, б – средняя структура, в – мелкозернистая (тяжелая или глинистая) структура, г – горные почвы

3.2. Картографирование риска ветровалов

Предварительный анализ данных для обучения модели оценки риска ветровалов включал построение корреляционной матрицы и оценку значимости признаков (Predictor Importance). Исходный объем выборки включал 104679 ячеек. Из нее были исключены объекты с долей

лесопокрытой площади менее 10%, в результате чего выборка сократилась до 90067 ячеек (в том числе 9320 ячеек с ненулевой площадью ветровала). Среднее значение предиктанта (доли площади ветровалов от площади леса в ячейке) составляет 0,23%, а для элементов выборки с ненулевой площадью – 2,4%. Такое распределение отражает тот факт, что большая часть лесопокрытой площади за изучаемый период не подвергалась воздействию ветров, способных вызвать ветровал.

Так как распределение в данных отличается от нормального, корреляционная матрица построена на основе ранговых коэффициентов Спирмена. Уровень значимости принят равным 0,05. По причине большого объема выборки все коэффициенты оказались статистически значимы. Предварительный анализ также включал оценку значимости признаков (Predictor Importance), которая выполняется в ходе обучения модели Random Forest Regressor.

Для прогнозирования риска ветровалов были применены два современных ансамблевых алгоритма машинного обучения – случайный лес и градиентный бустинг (Random Forest Regressor и XGBoost Regressor). Оба метода относятся к семейству деревьев решений, но значительно различаются подходом к построению ансамбля и оптимизации модели. Модели были обучены с использованием библиотеки Scikit-learn (Pedregosa et al., 2011) на языке программирования Python.

Модель градиентного бустинга была настроена с параметрами objective='reg:squarederror' для минимизации квадратичной ошибки и eval_metric='rmse' для отслеживания среднеквадратичной ошибки в процессе обучения, число, фиксирующее начальное состояние генератора случайных чисел random_state: 42 (в некоторых версиях seed). В практике машинного обучения это стандартное значение, упрощающее тестирование модели (Pedregosa et al., 2011). На тренировочных данных модель достигла показателей качества R^2 (доля объясненной вариации) = 0.7627, RMSE =

0.0024, что свидетельствует о хорошей способности модели описывать вариативность целевой переменной.

Модель случайного леса была обучена со следующими параметрами: n_estimators = 100 (определяет количество решающих деревьев в ансамбле); max_depth = (ограничивает максимальную глубину каждого дерева в ансамбле) (Pedregosa et al., 2011). Глубина 15 позволяет модели захватить сложные нелинейные зависимости в данных, предотвращая переобучение. Также было взято random_state = 42 (задает начальное значение для генератора случайных чисел). Для остальных параметров были заданы значения по умолчанию (Pedregosa et al., 2011). На обучающей выборке данных доля объясненной дисперсии составила 0.652, а RMSE = 0.0029 (что указывает на более низкую точность, чем у градиентного бустинга).

Выбор между методами зависит от конкретных условий задачи: XGBoost предпочтительнее при требовании высокой точности, а Random Forest лучше подходит при наличии шумных и высокоразмерных данных, а также при необходимости отбора признаков (Pedregosa et al., 2011). В настоящей работе были использованы обе модели.

Поскольку в качестве конечного результата необходимо получить оценку риска ветровалов для всей лесной зоны ЕТР, а обучающие данные собраны для этой же территории, был реализован следующий подход для получения прогнозируемых значений риска и оценки работоспособности модели. Все элементы выборки (ячейки расчетной сетки) были пять раз разделены на обучающие и проверочные данные в соотношении 80% на 20% таким образом, чтобы проверочные выборки, каждая из которых включает по 20% данных, не пересекались. Таким образом, в совокупности эти пять проверочных наборов составляют весь набор данных. Данная методика была применена к модели градиентного бустинга.

Далее из обучающих выборок были исключены 1% ячеек с наибольшей долей площади ветровала от площади леса (доля площади вывала от площади леса в ячейке для них составляла от 5,8% до 72%). Их исключение было

необходимо, поскольку на участках наиболее крупных ветровалов согласно карте лесов по состоянию на 2023 г. (рис. 3.2) широко распространены молодняки − леса, которые выросли уже после ветровала. Учет таких участков приводит к некорректной оценке значимости предикторов, т.е. к завышению значимости доли молодняков, произрастающих на участках бывших ветровалов.

Далее производилось обучение моделей на выборках из 80% данных (за вычетом 1% ячеек с наибольшей долей площади ветровала), и прогнозирование для оставшихся 20%. Объединением результатов прогнозирования для каждой из выборок, которая включала 20% данных, был получен итоговый результат. Оценка точности выполнена по значениям базовой ошибки модели (среднеквадратичной ошибки), которая рассчитана на основе разности фактической и прогнозируемой доли площади ветровала от площади леса в ячейке.

Результаты оценки значимости предикторов для выборки с исключением 1% объектов с наибольшей площадью ветровалов приведены в табл. 3.2. Самая сильная корреляция выявлена для трех предикторов – доли лесопокрытой площади, среднего запаса древесины и средней высоты древостоя в ячейке, которые также сильно коррелированы друг с другом (R> 0.8). Это отражает общую закономерность увеличения площади ветровалов по мере роста лесопокрытой площади. Среди показателей породного состава насаждений самые сильные корреляции выявлены для доли смешанных лесов, что отражает тот факт, что большая часть ветровалов происходила в смешанных лесах, в том числе и при крупных штормовых событиях (Chernokulsky et al., 2022). Для сосновых и темнохвойных лесов значимость существенно меньше. Из климатических предикторов наиболее значимым оказался параметр значительного торнадо STP, что соответствует ранее опубликованным оценкам его высокой корреляции с пространственным распределением ветровалов (Shikhov et al., 2025). Самые слабые корреляции

выявлены для характеристик рельефа и почвенного покрова, что может быть связано с их низкой детальностью, особенно для характеристик почв.

Наиболее значимыми признаками по результатам оценки при обучении модели случайного леса также оказались высота древостоя и доля лесопокрытой площади. Доля лиственных молодняков и доля смешанных лесов наиболее значимы среди характеристик преобладающих лесообразующих пород. Значимость доли лиственных молодняков связана с тем, что в ячейках сетки, где наблюдались некоторые крупные ветровалы, представлены характеристики лесного покрова уже после ветровала, а также на этих участках распространены вырубки, зарастающие лиственными породами. Среди климатических параметров наиболее значимыми оказалась повторяемость случаев очень сильного ветра и среднегодовой максимум скорости ветра в теплый период, однако здесь в оценке значимости отражается скорее отрицательная корреляция с распределением ветровалов.

Таблица 3.2 Коэффициенты корреляции (R) Спирмена между предиктантом и предиктором, и результаты оценки значимости признаков методом Random Forest

Переменная	R Спирмена	Значимость предиктора
Повторяемость случаев очень сильного ветра (≥ 25 м/с) в теплый период года	−0,18	0,065
Среднегодовой максимум скорости ветра в теплый период года	−0,05	0,060
Средняя плотность молниевых разрядов (разрядов в день на 1000 км) в летние месяцы	0,15	0,041
Повторяемость закритических значений композитного параметра суперячеек SCP	0,15	0,034
Повторяемость закритических значений параметра значительного торнадо STP	0,23	0,035
Доля площади леса от площади ячейки	0,39	0,085
Доля площади темнохвойных лесов (возраст от 35-40 лет) от площади ячейки	0,03	0,026
Доля площади сосновых лесов (возраст от 35-40 лет) от площади ячейки	−0,03	0,026
Доля площади смешанных лесов (возраст от 35-40 лет) от площади ячейки	0,35	0,049
Доля площади лиственных лесов (возраст от 35-40 лет) от площади ячейки	0,10	0,027

Доля площади сосновых лесов (возраст менее 35-40 лет) от площади ячейки	0,10	0,037
Доля площади темнохвойных лесов (возраст менее 35-40 лет) от площади ячейки	0,13	0,038
Доля площади смешанных лесов (возраст менее 35-40 лет) от площади ячейки	0,35	0,046
Доля площади лиственных лесов (возраст менее 35-40 лет) от площади ячейки	0,22	0,070
Средняя высота древостоя в ячейке	0,41	0,093
Средняя биомасса (запас древесины) в ячейке	0,39	0,041
Доля площади свежих вырубок (возраст 10 лет и менее) от площади ячейки	0,22	0,019
Доля площади буферных зон (150 м) вокруг свежих вырубок от площади ячейки	0,22	0,018
Средний уклон в ячейке, ˚	−0,02	0,038
Средняя выпуклость склонов (Convexity) в ячейке (безразмерная)	0,08	0,033
Доля площади положительных форм рельефа на основе классификации форм рельефа (TPI-Based Landforms Classification) от площади ячейки	−0,05	0,023
Средний индекс наветренного и подветренного склона (Wind Effect) от площади ячейки	0,06	0,043
Доля площади, занятой почвами с грубой (песчаной) структурой от площади ячейки	−0,01	0,014
Доля площади, занятой почвами со средней структурой от площади ячейки	0,03	0,018
Доля площади, занятой почвами с тяжелой (глинистой) структурой от площади ячейки	−0,06	0,017
Доля площади, занятой горными почвами от площади ячейки	−0,04	0,001

Основным результатом работы стали обзорные карты риска ветровалов в лесной зоне ЕТР, созданные6 в масштабе 1:15000000 (Приложение 7, 8). На карте показаны значения расчетного риска ветровалов (доля площади леса, которая может быть вывалена в каждой ячейке расчетной сетки размером 5000×5000 м). Также на карте показаны все ветровалы, наблюдавшиеся на ЕТР в период с 1985 г. по настоящее время. Из расчета исключены ячейки с площадью леса менее 10%.

Среднее расчетное значение предиктанта для модели случайного леса составило 0,10%, а для модели градиентного бустинга 0,11%. Фактическая доля площади ветровалов от площади лесов составляет 0,23%. Расхождение

обусловлено тем, что как отмечено выше, при обучении были исключены ячейки сетки с наибольшей площадью ветровалов.

Оценка достоверности результатов моделирования выполнена визуально и на основе сопоставления расчетной и фактической доли площади ветровалов в ячейках сетки. Визуальная оценка показывает, что высокую оценку риска получили районы с максимальной долей лесопокрытой площади, с широким распространением темнохвойных и смешанных лесов и с высоким запасом древесины и высотой древостоя. Это в целом соотносится с фактическими данными, поскольку наибольшая плотность ветровалов наблюдается именно в этих районах. На территориях с минимальным расчетным риском (где ожидаемая доля площади ветровала менее 0,05%) ветровалы не встречаются.

Выделяется несколько максимумов расчетного риска, которые в разной степени согласуются с фактическим распределением ветровалов. Так, лучше всего соответствует им максимум на западных склонах Северного Урала в пределах Пермского края, где распространены первичные темнохвойные леса (эта территория является южной частью крупнейшего массива темнохвойных лесов в Европе). Однако к северу расчетный риск ветровалов значительно уменьшается, что обусловлено, по всей видимости, снижением значений предикторов возникновения шквалов и смерчей (параметров STP и SCP, что видно на рис. 3.1). Высокий риск ветровалов также характерен для северной части Нижегородской, Костромской, Кировской областей и северо-запада Пермского края, что также хорошо соответствует данным наблюдений. Для этой территории характерно сочетание высокой доли лесопокрытой площади и высоких значений климатических предикторов (плотности молниевых разрядов и значений параметров SCP и STP). Аналогичные особенности характерны и для части территории Тверской и Новгородской областей. Однако по данным модели случайного леса еще один максимум риска ветровалов, выделенный на Южном Урале, не соответствует данным наблюдений. Для Южного Урала характерна близкая к 100% доля

лесопокрытой площади, высокий запас древесины, и максимальная в пределах ЕТР молниевая активность. Однако за период 1986 – 2023 гг. ветровалов здесь практически не было. При этом территория Южного Урала имеет низкую оценку риска ветровалов, полученную методом градиентного бустинга.

Минимальный риск ветровала характерен для подзоны северной тайги от Мурманской области и Карелии до востока Республики Коми. Здесь произрастают темнохвойные и сосновые леса, которые характеризуются низкой высотой древостоя и запасом, что может определять их большую устойчивость к воздействию ветра. Также здесь отмечается минимальная молниевая активность и низкие значения предикторов возникновения шквалов и смерчей (рис. 3.1). Лиственные леса на юге и юго-западе территории также характеризуются низким риском ветровалов, но все же его расчетные значения здесь выше, чем на севере, по причине более высоких значений климатических предикторов. Здесь возникновение крупных ветровалов ограничено прежде всего низкой долей лесопокрытой площади.

При сопоставлении результатов (рис. 3.5), полученных методами градиентного бустинга и случайного леса выявлена высокая корреляция (R^2 =0,65). Сопоставление распределения значений прогнозируемого риска демонстрирует что большинство значений сосредоточены в диапазоне от 0 до 0,5% и лишь небольшой процент от числа ячеек превышает 0,5%. Таким образом модели чаще предсказывают достаточно низкую ожидаемую площадь ветровала. При этом значения ожидаемой площади ветровала выше 0,4% чаще прогнозируются методом градиентного бустинга, а значения в диапазоне от 0,1% до 0,3% методом случайного леса.

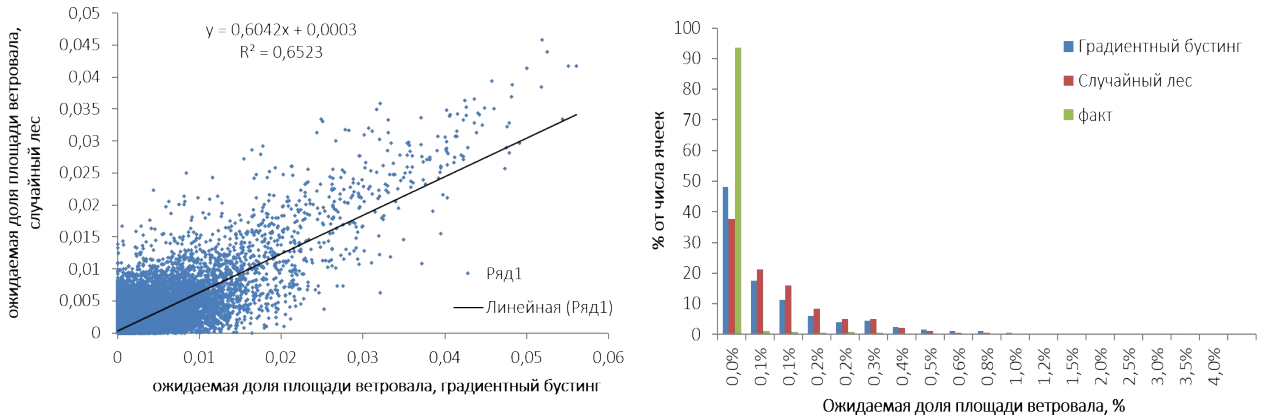


Рис. 3.5. Сопоставление результатов, полученных методами градиентного бустинга и случайного леса

Количественная оценка проведена путем расчета корреляции между ожидаемой и фактической долей площади ветровалов как для всех ячеек, так и после агрегирования данных. Для результата, полученного методом случайного леса, при расчете по исходным ячейкам сетки (N=90067 ячеек) R Спирмена составил 0,32. Это статистически значимая корреляция, однако такое значение указывает на существенные расхождения между фактической и модельной долей площади ветровалов от площади ячеек сетки. Прежде всего они обусловлены редкостью и локальным характером штормовых событий, способных вызвать ветровалы – из всей площади лесов с высокой оценкой риска ветровалов лишь незначительная часть подвергалась воздействию ветров такой силы.

Также было проведено агрегирование данных для оценки точности. Пространственное агрегирование было выполнено путем создания еще одной расчетной сетки, но с размером ячейки 50×50 км, в каждой ячейке которой рассчитана фактическая площадь ветровалов и прогнозируемая доля площади на основе исходной сетки (рис. 3.6). В данном случае также выявлена умеренная корреляция: для модели случайного леса R2=0.26, а для градиентного бустинга R2=0,32, но меньший объем выборки (N=1049) позволяет лучше увидеть закономерности. В частности, выделяется несколько точек (ячеек расчетной сетки) с очень большой фактической площадью ветровала (от 50 до 211 км^2), но с умеренной оценкой риска. Это

ячейки, подвергшиеся воздействию разрушительных шквалов (деречо) летом 2010 г., на которые приходится свыше 27% от общей площади ветровалов на ЕТР. По результатам, полученным методом случайного леса, также выделяется точка с высоким значением ожидаемой площади ветровала (0,7% площади леса в ячейке), но с нулевым значением фактической площади. Она приурочена к области с высоким расчетным риском на Южном Урале (рис. 3.6б), где фактически ветровалов не было. При исключении этих объектов значение R^2 повышается до 0,43. То есть главным фактором, обуславливающим снижение R^2, в данном случае является неравномерность распределения ветровалов по площади даже в тех лесах, где есть условия для их возникновения. Фактически ветровалы распределены по площади более неравномерно, чем переменные, определяющие риски ветровала.

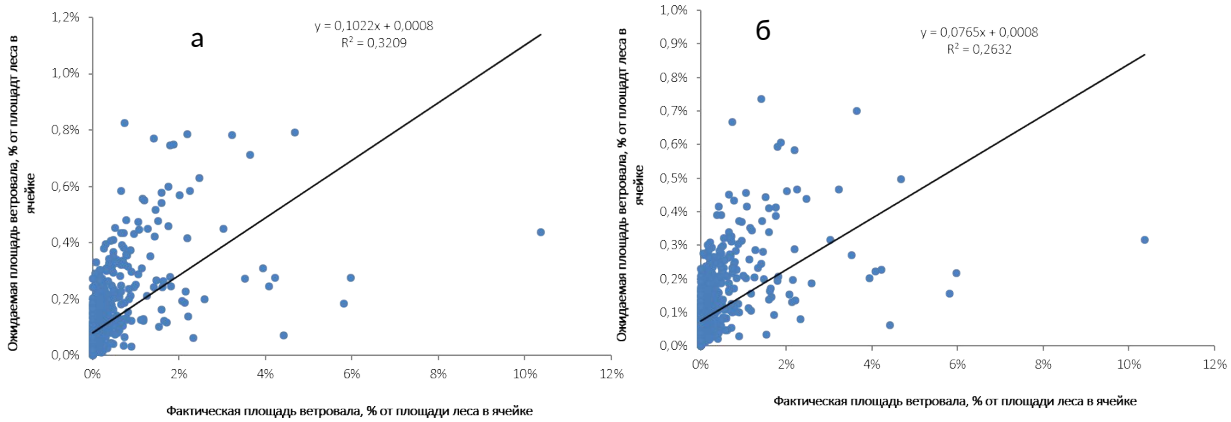


Рис. 3.6. Зависимость между фактической площадью ветровала и ожидаемой долей площади ветровалов от площади леса, рассчитанная для ячеек 50×50км: градиентный бустинг (а) и случайный лес (б)

Также выполнено агрегирование исходного набора данных путем его классификации на 100 классов методом квантилей. В каждом классе рассчитана площадь ветровалов по фактическим данным и ожидаемая площадь ветровала. По результатам расчета зависимости между фактической и прогнозируемой площадью ветровалов для 100 групп значение R2 для модели Randon Forest Regressor составило 0,956 (рис. 3.7. а), для градиентного бустинга R2 0.942 (рис. 3.7. б). Высокая корреляция

обусловлена тем, что в основном ветровалы наблюдались на участках с высокими значениями расчетного риска. При этом вышеперечисленные расхождения между пространственным распределением ожидаемой и фактической площадью ветровалов (например, на Южном Урале) при таком способе оценки не проявляются.

Оценка точности также была проведена на примере трех субъектов РФ путем исключения их из обучающего набора. Для оценки точности были выбраны Пермский край, Республика Удмуртия и Кировская область. Для данных регионов характерны схожие свойства лесных насаждений, а также регулярная фиксация случаев ветровалов в период исследований. В ходе обучения модели проведено изъятие указанных субъектов из обучающей выборки. Далее ячейки расчетной сетки, покрывающие данную территорию, использовались в качестве независимого набора данных. В результате проведена оценка риска ветровалов на независимых данных и создана соответствующая карта (рис. 3.8). Средняя фактическая доля площади ветровала в ячейке составила 0,4%, тогда как ожидаемая доля площади ветровала 0,3%.

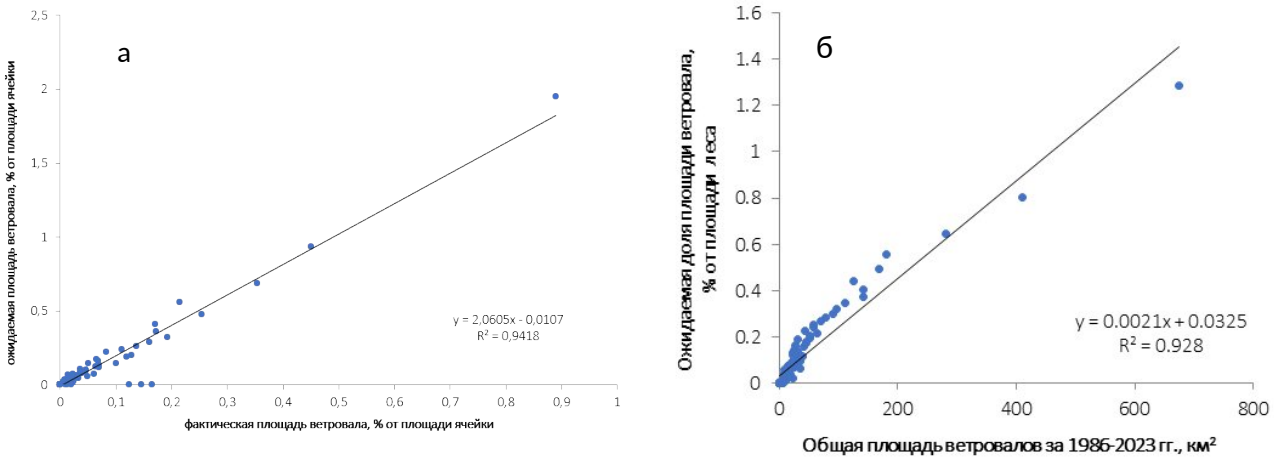


Рис.3.7 Зависимость между фактической площадью ветровала и ожидаемой долей площади ветровалов от площади леса, рассчитанная после агрегирования исходных данных на 100 равных групп методом квантилей: градиентный бустинг (а) и случайный лес (б)

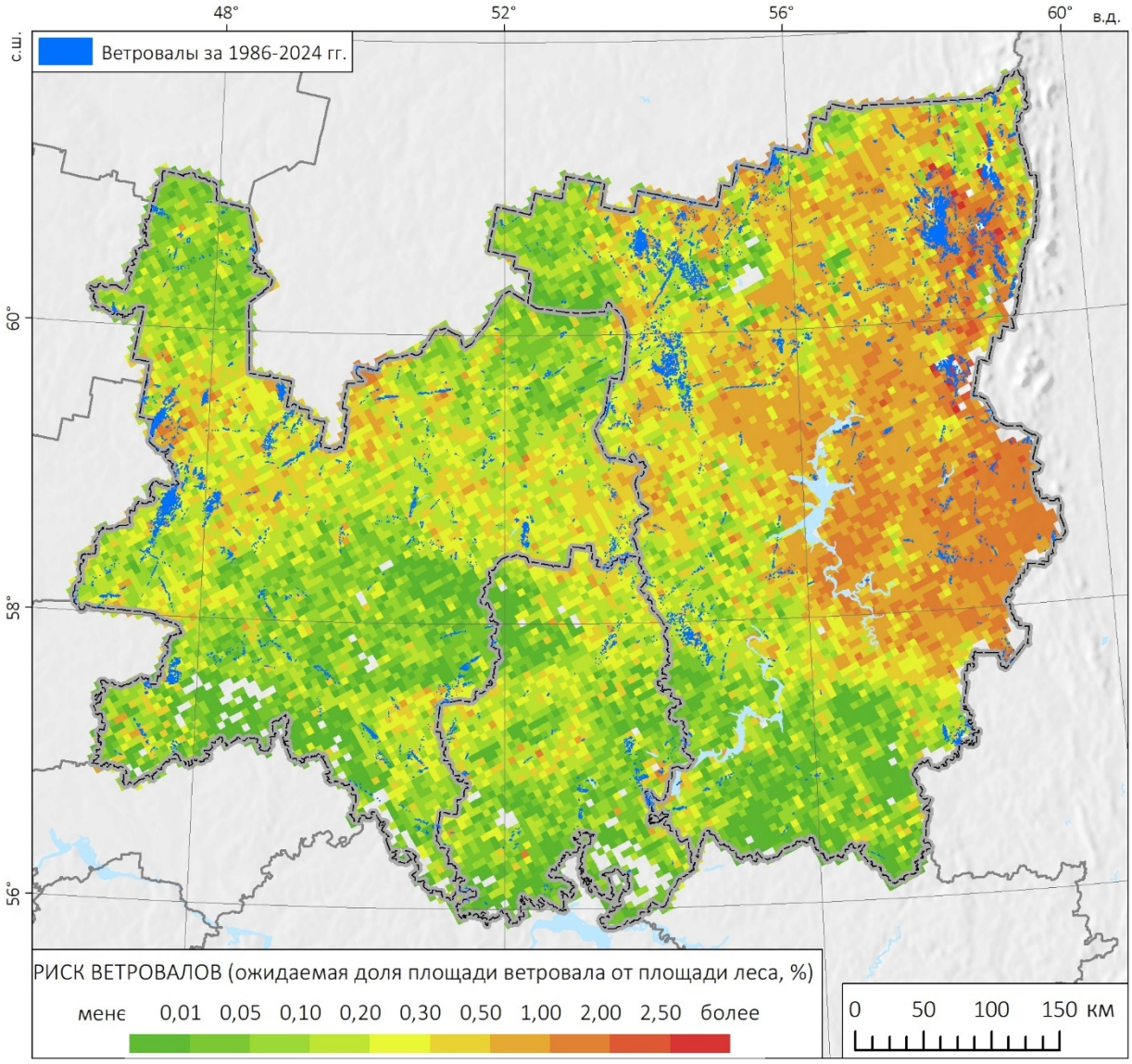


Рис. 3.8. Расчетная величина риска ветровалов, определенная моделью обученной на независимой выборке

Количественная оценка полученных результатов проведена путем агрегирования данных и сравнения с фактической площадью ветровалов. При классификации набора данных на 100 классов методом квантилей выявлена умеренная корреляция (R^2 = 0,52) фактической и прогнозируемой доли площади ветровала от площади ячейки расчетной сетки (рис 3.9.)

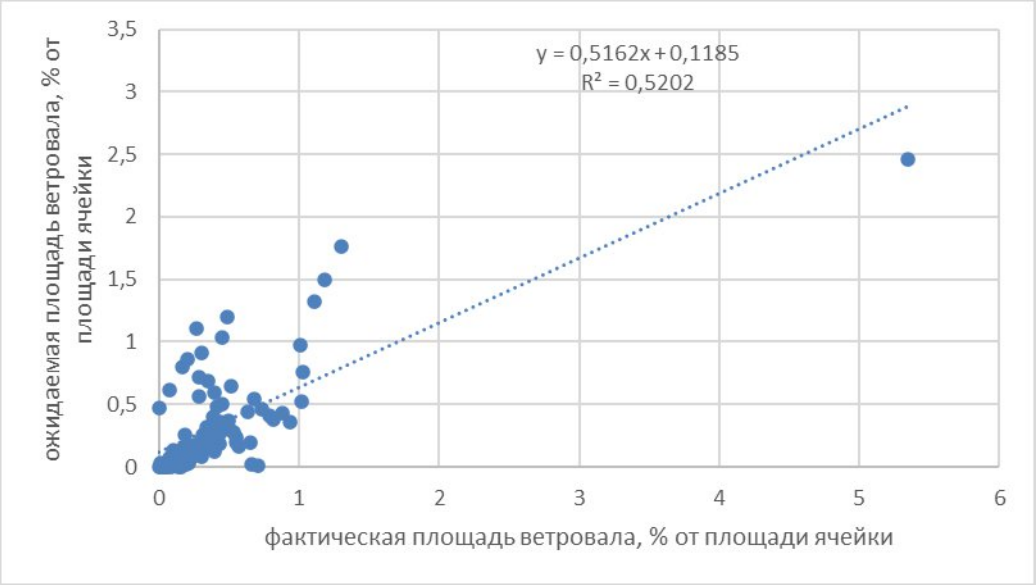


Рис. 3.9. Зависимость между фактической площадью ветровала и ожидаемой долей площади ветровалов от площади леса, рассчитанная после агрегирования исходных данных на 100 равных групп методом квантилей

3.3. Вывод по главе 3

В результате исследования получена впервые созданная карта риска ветровалов в лесной зоне ЕТР. При расчете риска были учтены составляющие опасности (повторяемости и интенсивности сильных ветров, вызывающих ветровалы), подверженности и уязвимости. Модели машинного обучения (случайного леса и градиентного бустинга) были обучены по выборке, собранной на основе данных наблюдений сети метеостанций, сети грозопеленгации, реанализа ERA5, открытых спутниковых данных, цифровых моделей рельефа и продуктов их обработки, а также глобальных почвенных карт. Всего было выделено 26 предикторов (5 из них используется для оценки опасности штормовых событий, 1 – подверженности и 20 – уязвимости лесов). Значения предикторов (независимых переменных) и предиктанта (зависимой переменной) рассчитаны в ячейках регулярной сетки размером 5000×5000 м. Объем выборки за вычетом участков, не покрытых лесом, составил 90067 ячеек сетки. Наиболее значимыми предикторами оказались доля лесопокрытой

территории, средняя высота и запас древесины. В ранее опубликованных работах (Suvanto et al., 2019; Pawlik and Harrison, 2022) наиболее значимым предиктором оказался возраст насаждений, но в настоящей работе данные о возрасте были получены всего по двум градациям, поэтому значимость запаса древесины и высоты деревьев оказалась выше.

Выполнена верификация полученного результата на основе сопоставления с фактическим пространственным распределением ветровалов за 1986 – 2024 гг. Оценка показала достаточно высокую корреляцию между фактической и ожидаемой площадью ветровалов, особенно после агрегирования данных. Это показывает, что в основном ветровалы происходили в тех районах, где по модели воспроизводится высокий риск (значительная ожидаемая площадь вывала). Вместе с тем, имеется ряд несоответствий между расчетами и фактическими данными. Эти несоответствия обусловлены следующими факторами:

1. Почти все ветровалы, включенные в выборку, произошли еще до создания карт растительного покрова и параметров насаждений (высоты, запаса), данные с которых использованы в качестве предикторов. То есть на участках ветровалов произрастают молодняки, которые в настоящее время характеризуются минимальной уязвимостью к воздействию ветра. Для минимизации влияния этого фактора из обучения был изъят 1% ячеек сетки с наибольшей площадью ветровала. В ячейках, использованных для обучения, доля площади ветровала от площади леса не превышает 5,8%.

2. Значительная часть площади ветровалов обусловлена редкими сильными долгоживущими шквалами (деречо). Только на два подобных события лета 2010 г. приходится свыше 27% всей площади ветровалов в лесной зоне ЕТР (Chernokulsky et al., 2022). Поскольку эти события на ЕТР крайне редки, имеющийся ряд наблюдений с 1986 по 2024 гг. не позволяет выявить закономерности их пространственного распределения.

3. Значительная часть площади лесов, уязвимых к ветровому воздействию, не подвергалась такому воздействию за период с 1986 по 2024

гг., что оказывает влияние на оценку значимости предикторов и конечный результат моделирования.

4. Несовершенство некоторых исходных данных, в том числе низкая детальность использованной карты почв, отсутствие данных о мощности почвенного профиля, а также неточности оценок высоты древостоя и запасов древесины из глобальных тематических продуктов также могли повлиять на итоговый результат.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Ветровалы являются значимым природным фактором нарушения лесов. Оценка и моделирование уязвимости лесов к ветровалам предполагает детальное изучение характеристик насаждения, факторов местоположения и характера лесопользования. Оценка значимости факторов уязвимости важна для формирования планов профилактических мероприятий обеспечивающих снижение негативных последствий ветровалов. Оценки риска ветровалов являются неотъемлемой частью комплексного подхода к управлению рисками и обеспечению устойчивого развития регионов в условиях меняющегося климата. В рамках исследования получены результаты, которые важны для углубления понимания ветровалов как фактора нарушений лесного покрова и условий их возникновения. Поставленные задачи были решены. Основные результаты включают:

1. Получена количественная оценка значимости факторов, определяющих уязвимость лесов к воздействию ветра и риск ветровалов. К наиболее значимым факторам, определяющим уязвимость лесов (на примере Пермского края), относится доля площади темнохвойных и сосновых лесов, а также высота и запас древесины. При оценке риска ветровалов для лесной зоны ЕТР в целом наиболее значимыми факторами оказались доля лесопокрытой территории и также средняя высота и запас древостоя. Возраст древостоя также существенно влияет на устойчивость к воздействию сильных ветров, но количественно оценить вклад данной переменной не удалось в связи с отсутствием данных. Тем не менее, наиболее высокие оценки уязвимости к ветровому воздействию и риска ветровалов получены для участков, где распространены первичные темнохвойные леса

2. Создана карта растительности Пермского края с пространственным разрешением 30 м. Карта включает 19 тематических классов, 11 из них содержат информацию о лесной растительности. Оценка точности полученных данных выполнена с использованием карты растительности России, полученной по спутниковым данным MODIS, а

также материалов лесоустроительных работ по двум лесничествам Пермского края. Наибольшая точность классификации характерна для темнохвойных и сосновых лесов (по данным карты растительности России - около 70%, а по материалам лесоустройства − около 75%). Класс лиственных лесов выделен с наименьшей точностью, поскольку в валидационных данных он частично отнесен к классу смешанных лесов с преобладанием лиственных пород.

3. С помощью модели Random Forest (в постановке регрессии) выполнена оценка уязвимости лесов к ветровому воздействию, на примере территории Пермского края. На основе открытых спутниковых данных, продуктов их обработки и цифровых моделей рельефа создана обучающая выборка, включающая свыше 102 тыс. объектов. Предикторами были 16 характеристик лесного покрова (преобладающие породы, возраст, запас, высота древостоя) и рельефа местности. На основе модели выполнен расчет уязвимости лесов Пермского края к ветровому воздействию и создана соответствующая карта. Показано, что модель не позволяет корректно оценить пространственное распределение повреждения леса на локальном уровне (для отдельного ветровала), поскольку не учитывает неоднородное распределение скорости ветра в пространстве. Однако для территории Пермского края в целом полученная оценка хорошо согласуется с наблюдаемым пространственным распределением ветровалов за последние 40 лет (с R_2 = 0,67). Также на основе полученной оценки уязвимости выполнена типизация лесов Пермского края по условиям возникновения ветровалов, которая позволяет сопоставить преобладающие породы, возраст и степень уязвимости к воздействию ветра.

4. Выполнена оценка риска ветровалов в лесной зоне Европейской территории России на основе двух моделей машинного обучения – случайного леса и градиентного бустинга. В качестве предикторов рассмотрены 26 независимых переменных, которые позволяют оценить опасность (повторяемость и интенсивность сильных ветров, вызывающих

ветровалы), а также подверженность и уязвимость лесов к ветровому воздействию. В результате созданы карты риска ветровалов в лесной зоне ЕТР, на которых показана ожидаемая доля площади леса, которая может быть вывалена в каждой ячейке сетки размером 5×5 км. Достоверность полученной оценки риска оценивалась на основе фактических данных о ветровалах на территории исследования за период 1986-2024 гг. В целом по лесной зоне ЕТР отмечена высокая корреляция между ожидаемой (модельной) и фактической площадью ветровалов. Валидация на независимых данных выполнена для трех субъектов РФ – Пермского края, Кировской области и Удмуртии, для которых выявлена умеренная корреляция (R^2 = 0,52) фактической и прогнозируемой доли площади ветровала. При этом максимальная оценка риска приходится на северо-восточные районы Пермского края с широким распространением первичных темнохвойных лесов. Основной причиной расхождений между фактической и прогнозируемой долей площади ветровала является неравномерность пространственного распределения ветровалов и редкость возникновения метеорологических явлений, вызывающих крупные ветровалы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алексеев А. С. Выявление повреждений хвойных насаждений на основе комплексного анализа результатов дистанционного зондирования Земли и наземных обследований / А. С. Алексеев, Д. М. Черниховский // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. – 2024. – № 2(398). – С. 11-28. – DOI 10.37482/0536-1036-2024-2-11-28. – EDN YDQSLN.
2. 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 научной конференции, посвященной 35-летию Висимского заповедника, Екатеринбург, 02–03 октября 2006 года / Ответственный редактор: Ю.Ф. Марин; Министерство природных ресурсов РФ; Федеральная служба по надзору в сфере природопользования; ГУ «Висимский государственный природный заповедник»; Российская Академия наук, Уральское отделение; ФГУ «Институт экологии растений и животных». – Екатеринбург: Новое время, 2006. – 336 с. – ISBN 5-7450-0473-8. – EDN QKPGZR.
3. Балдина Е.А., Лабутина И.А. Дешифрирование аэрокосмических снимков: учебник. 2-е изд., перераб. и дополн. М.: Добросвет, 2021. 269 с. (Электронное издание). URL: https://bookonlime.ru/node/6333 (дата обращения: 31.01.2022).
4. Барталев С.А., Егоров В.А., Ершов Д.В., Исаев А.С., Лупян Е.А., Плотников Д.Е., Уваров И.А. Спутниковое картографирование растительного покрова России по данным спектрорадиометра MODIS // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2011. Т.8. № 4. С. 285–302.
5. Барталев С.А., Егоров В.А., Жарко В.О., Лупян Е.А., Плотников Д.Е., Хвостиков С.А., Шабанов Н.В. Спутниковое картографирование растительного покрова России. М., ИКИ РАН. 2016. 208 с.

6. Бузим А. Н., Солдатов М. А., Ильясова М. К., Кластерный анализ в региональном районировании // Ученые записки Крымского федерального университета имени В. И. Вернадского. Экономика и управление. 2007. №1. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/klasternyy-analiz-v-regionalnom-rayonirovanii (дата обращения: 10.05.2026).
7. Бэггинг и случайный лес. Ключевые особенности и реализация с нуля на Python (Электронный ресурс) // URL: https://habr.com/ru/articles/801161/
8. Белоусова А.П., Брыжко И.В. Анализ зарастания сельскохозяйственных угодий на территории Пермского края по спутниковым снимкам Landsat // ИнтерКарто. ИнтерГИС. Геоинформационное обеспечение устойчивого развития территорий: мат. Межд. конф. М.: Изд-во Моск. ун-та, 2021. Т. 27. Ч. 4. С. 150–161.
9. 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.
10. Валом повалило: исследование ветровалов в России в 2023-2024 годах. Геопространственная аналитика // URL: https://geonovosti.terratech.ru/nature/valom-povalilo-issledovanie-vetrovalov-v-rossii-v-23-24-godakh/?ysclid=mf46o1igwk876649062
11. Волкова, Е. С. Особенности картографирования процессов инвазии вредителей леса / Е. С. Волкова, М. А. Мельник // Картографирование биоты: традиции и актуальные вопросы развития : Материалы Международной научной конференции, посвященной 85-летию со дня рождения д.г.н. Алексея Васильевича Белова и д.б.н. Валерия Федоровича Лямкина, Иркутск, 10–12 октября 2023 года / Под редакцией В.М. Плюснина, И.Н. Владимирова. – Иркутск: Институт географии им. В.Б. Сочавы Сибирского отделения Российской академии наук, 2023. – С. 29-32. – EDN LBMFEP.

12. Глушков И., Лупачик В., Прищепов А., Потапов П., Пукинская М., Ярошенко А., Журавлева И. Картирование заброшенных земель в Восточной Европе с помощью спутниковых снимков Landsat и Google Earth Engine // GIS-лаборатория. 2019.
13. ЕМИСС – Единая межведомственная информационно-статистическая система (Электронный ресурс) //URL: https://fedstat.ru/
14. Зибров, Г.В. Методологические аспекты графо-аналитического подхода к комплексному геоэкологическому районированию территорий / Г.В. Зибров, В.М. Умывакин, А.В. Пахмелкин // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Геология .— 2010 .— №1 .— С. 268-279
15. ИАС «Лесной диспетчер Пермского края» (Электронный ресурс) // URL: http://gis.rkomi.ru/fires59 (дата обращения: 31.01.2022).
16. Интерпретация комбинаций каналов данных Landsat TM / ETM+ // URL: https://gislab.info/qa/landsat-bandcomb.html (дата обращения: 31.01.2022).
17. Ишутин Я. Н. Лесопожарное районирование территории алтайского края в целях устойчивого лесопользования // Ползуновский вестник. 2005. №4-2.
18. Кархова, С. А. Деградация лесов мира и проблема обезлесения / С. А. Кархова, Г. В. Давыдова // Евроазиатское сотрудничество: Материалы международной научно-практической конференции, Иркутск, 14–15 сентября 2017 года. – Иркутск: Байкальский государственный университет, 2017. – С. 109-118. – EDN VUROUP.
19. Киселев А.В., Тронин А.А., Крицук С.Г., Горный В.И., Храмцов В.Н. Многолетняя динамика состояния ельников заказника «Озеро Щучье» по спутниковым данным // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2025. Т. 22. № 2. С. 173–185.
20. Коротков В.Н., Константинов А.В.,2022: Лесное хозяйство / Третий оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации / под ред. В. М. Катцова; Росгидромет. – Санкт-Петербург: Наукоемкие технологии. – С. 357 – 365.

21. Кривогорницына, М. А. Проблема восстановления лесов на территории Российской Федерации / М. А. Кривогорницына, А. В. Никончук // Инновации в химико-лесном комплексе: тенденции и перспективы развития: Сборник материалов Всероссийской научно-практической конференции, Красноярск, 02–04 июня 2021 года. – Красноярск: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева", 2021. – С. 21-23. – EDN NFMMKF.
22. Крылов, А. М. Дистанционный мониторинг состояния лесов по данным космической съемки / А. М. Крылов, Н. А. Владимирова // Геоматика. – 2011. – № 3. – С. 53-57. – EDN STYTOZ.
23. Крылов, А. М. Выявление очагов короеда -типографа в Московской области с использованием снимков Landsat / А. М. Крылов, А. А. Соболев, Н. А. Владимирова // Вестник Московского государственного университета леса - Лесной вестник. – 2011. – № 4. – С. 54-60. – EDN MNTQEF.
24. Крылов, А. М. Выявление и оценка площадей катастрофических ветровалов 2009–2010 гг. по данным космической съемки / А. М. Крылов, Е. Г. Малахова, Н. А. Владимирова // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. – 2012. – № 200. – С. 197-207. – EDN RHMIAP.
25. Курбанов Э.А., Воробьев О.Н., Лежнни С.А., Губаев А.В., Полевщикова Ю.А. Тематическое картирование растительного покрова по спутниковым снимкам: валидация и оценка точности: монография – Йошкар-Ола: Поволжский государственный технологический университет, 2015. 132 с.
26. Лескинен П., Линднер М., Веркерк П.Й., Набуурс Г.Я., Ван Брусселен Й., Куликова Е., Хассегава М. и Леринк Б. (ред.) 2020. Леса России и изменение климата. Что нам может сказать наука 11. Европейский институт леса.

27. Лесной план Пермского края на 2018-2027 годы. (Электронный ресурс) // URL: https://priroda.permkrai.ru/deyatelnost/lesnoe-khozyaystvo/lesnoy-plan-permskogo-kraya
28. Лупян Е.А., Барталев С.А., Балашов И.В., Егоров В.А., Ершов Д.В., Кобец Д.А., Сенько К.С., Стыценко Ф.В., Сычугов И.Г. 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.
29. Овеснов, С. А. Ботанико-географическое районирование Пермской области / С. А. Овеснов // Вестник Пермского университета. – 2000. – № 2. – С. 13-21. – EDN YNBQRY.
30. Ольховка, И. Э. Лесопожарное районирование лесов Курганской области и рекомендации по их противопожарному обустройству / И. Э. Ольховка, С. В. Залесов // Современные проблемы науки и образования. – 2013. – № 5. – С. 687. – EDN RRKADH.
31. Парамонов, Е. Г. Лесопожарное районирование лесного фонда Республики Алтай / Е. Г. Парамонов, М. А. Терехов // Мир науки, культуры, образования. – 2008. – № 3(10). – С. 4-6. – EDN JUJKZV.
32. Петухов И.Н. Роль массовых ветровалов в формировании лесного покрова в подзоне южной тайги (Костромская область): дисс. канд. биол. наук. Кострома, 2016. 150 с.
33. Природные пожары по данным Рослесхоза с 2000 года//Рослесхоз; обработка «Если быть точным», 2024. Условия использования: Creative Commons BY 4.0. URL: https://tochno.st/datasets/fires
34. Росстат, Статистический сборник «Охрана окружающей среды в России», М. -2018 г
35. Скворцова Е.Б., Уланова Н.Г., Басевич В.Ф. Экологическая роль ветровалов. М., 1983. 122 с.
36. Смерчи в лесной зоне России. Электронный ресурс:

https://tornado.gispsu.ru/. (дата обращения 03.10.2025)

37. Топоров, А. В. Методы статистического анализа для оценки однородности пространственно - распределенных данных и экологического районирования / А. В. Топоров, И. И. Пивоварова, С. В. Саркисов // Актуальные проблемы военно-научных исследований. – 2019. – № S2(3). – С. 49-57. – EDN FTWCXX.
38. Ханина Л.Г., Бобровский М.В., Смирнов В.Э., Иващенко К.В., Журавлева А.И., Жмайлов И.В / Влияние массового ветровала в широколиственном лесу на свойства песчаных и суглинистых почв // Математическая биология и биоинформатика: доклады Международной конференции, Пущино, 17–19 октября 2022 года. Том 9. – Пущино: Институт математических проблем биологии РАН, 2022. – С. 217-220. – DOI 10.17537/icmbb22.50. – EDN TOXCNC.
39. Ханина Л.Г., Иващенко К.В., Смирнов В.Э., Бобровский М.В. / Запасы углерода и азота, микробная активность гумусового горизонта суглинистых почв после массового ветровала в широколиственном лесу заповедника “Калужские засеки” // Почвоведение. – 2024. – № 11. – С. 1488-1502. – DOI 10.31857/S0032180X24110046. – EDN JOTCVK.
40. Чернокульский А.В., Елисеев А.В., Козлов Ф.А., Коршунова Н.Н., Курганский М.В., Мохов И.И., Семенов В.А., Швець Н.В., Шихов А.Н., Ярынич Ю.И. Опасные атмосферные явления конвективного характера в России: наблюдаемые изменения по различным данным // Метеорология и гидрология. 2022. № 5. С. 27–42. URL: http://mig-journal.ru/archive?id=5702
41. ШЕЙНГАУЗ А.С., ДОРОФЕЕВА А.А., ЕФРЕМОВ Д.Ф., САПОЖНИКОВ А.П. Комплексное лесохозяйственное районирование. – Владивосток : Дальневосточное книжное издательство, 1980. – 142 с. – EDN WYMYOP.
42. Шихов А.Н., Герасимов А.П., Пономарчук А.И., Перминова Е.С. Тематическое дешифрирование и интерпретация космических снимков среднего и высокого пространственного разрешения: учеб. пособие / Перм. гос. нац. иссл. ун-т. Пермь, 2020. 191 с. (Электронное издание).

43. Шихов А.Н., Дремин Д.А. Закономерности повреждения ветровалами лесов европейской территории России и Урала: анализ по спутниковым данным // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2021. Т. 18. № 3. С. 153–168. DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-3-153-168.
44. 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.
45. Шихов А. Н., Семакина А.В., Картографирование растительного покрова Пермского края по спутниковым снимкам Landsat // Географический вестник. – 2022. – № 1(60). – С. 150-164. – DOI 10.17072/2079-7877-2022-1-150-164. – EDN NZRXVG.
46. Шихов А.Н., Чернокульский А.В., Калинин Н.А., Пьянков С.В. Ветровалы в лесной зоне России и условия их возникновения: монография. – Пермь, 2023. – 284 с.
47. Albrecht A.T., Jung C., Schindler D. Improving empirical storm damage models by coupling with high-resolution gust speed data // Agricultural and Forest Meteorology. 2019. V. 268. P. 23–31. DOI: 10.1016/j.agrformet.2018.12.017.
48. Andela, N., Morton, D. C., Giglio, L., Chen, Y., Van Der Werf, G. R., Kasibhatla, P. S., Defries, R. S., Collatz, G. J., Hantson, S., Kloster, S., Bachelet, D., Forrest, M., Lasslop, G., Li, F., Mangeon, S., Melton, J. R., Yue, C., and Randerson, J. T. 2017. A human driven decline in global burned area, Science, 356, 1356–1362. https://doi.org/10.1126/science.aal4108.
49. Baatz, Roland & Franssen, Harrie-Jan & Euskirchen, Eugénie & Sihi, Debjani & Dietze, M. & Ciavatta, Stefano & Fennel, Katja & Beck, H. & De Lannoy, Gabriëlle & Pauwels, V. & Raiho, A. & Montzka, Carsten & Williams, M. & Mishra, Umakant & Poppe Terán, Christian & Zacharias, Steffen & Lausch, Angela & Samaniego, Luis & van looy, Kris & Vereecken, Harry. (2021).

Reanalysis in Earth System Science: Toward Terrestrial Ecosystem Reanalysis. Reviews of Geophysics. 59. 10.1029/2020RG000715.

50. Bartalev, S.A., Belward, A., Ershov, D.V., Isaev, A.S. (2003), A New SPOT4-VEGETATION
Derived Land Cover Map of Northern Eurasia, International Journal of Remote Sensing, vol. 24(9),pp. 1977–1982.
51. Bartalev, S.A., Egorov, V.A., Loupian, E.A., Khvostikov, S.A. (2014), A new locally-adaptive classification method LAGMA for large-scale land cover mapping using remote-sensing data, Remote Sensing Letters, vol. 5(1), pp. 55–64.
52. Böhner, Jürgen & Antonić, Oleg. (2009). Chapter 8 Land-Surface Parameters Specific to TopoClimatology. Developments in Soil Science. 33. 10.1016/S0166-2481(08)00008-1.
53. Brys, Guy & Hubert, Mia & Struyf, Anja. (2004). A robustification of the Jarque-Bera test of normality. Proceedings in Computational Statistics (pp.753-760) / Edition: 2004. Chapter: A robustification of the Jarque-Bera test of normality. Publisher: Springer-Verlag, Heidelberg Editors: J. Antoch
54. Brooks H.E., Doswell III C.A., Zhang X., Chernokulsky A., Tochimoto E., Hanstrum B., Nascimento E., Sills D., Antonescu B., Barrett B. 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. 2019
55. Chernokulsky A. et al. Tornadoes in Northern Eurasia: from the Middle Age to the Information Era // Mon. Wea. Rev., 2020, Vol. 148, P. 3081–3111.
56. Chernokulsky A., Shikhov A., Bykov A., Kalinin N., Kurgansky M., Sherstyukov B., and Yarinich Y. Diagnosis and modelling of two destructive derecho events in European Russia in the summer of 2010. Atmos. Res.. 2022. V. 267. Art. No. 105928. DOI: 10.1016/j.atmosres.2021.105928.

57. Chernokulsky A.V., Eliseev A.V., Kozlov F.A., Korshunova N.N., Kurgansky M.V., Mokhov I.I., Semenov V.A., Shvets' N.V., Shikhov A.N., Yarinich Y.I. Atmospheric severe convective events in Russia: Changes observed from different data // Russ. Meteorol. Hydrol. 2022. V. 47(5). P. 343–354. DOI: 10.3103/S106837392205003X,
58. 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. DOI: 10.3390/atmos14010174.
59. Curtis Philip, Slay Christy, Harris Nancy, Tyukavina Alexandra, Hansen Matthew. (2018). Classifying drivers of global forest loss. Science. 361. 1108-1111. 10.1126/science.aau3445
60. Della-Marta, Paul & Mathis, Hubert & Frei, Christoph & Liniger, Mark & Kleinn, Jan & Appenzeller, Christof. (2009). The return period of wind storms over Europe. International Journal of Climatology. 29. 437 - 459. 10.1002/joc.1794.
61. Dhubháin, Áine & Farrelly, Niall. (2018). Understanding and managing windthrow. Wind is the most significant abiotic factor causing damage to forests in Ireland. Silviculture/Management No. 23. COFORD
62. Dobbertin, M., 2002. Influence of stand structure and site factors on wind damage comparing the storms Vivian and Lothar. For. Snow Landsc. Res. 77, 187–205.
63. Forgy E. Cluster analysis of multivariate data: efficiency vs. interpretability of classifications // Biometrics. 1965. 21 P. 768.
64. Gardiner, B.; Byrne, K.; Hale, S.; Kamimura, K.; Mitchell, S.J.; Peltola, H.; Ruel, J.-C. A review of mechanistic modelling of wind damage risk to forests. Forestry 2008,81, 447–463.
65. Gardiner , B. , Peltola , H. and Kellomдki , S. 2000 Comparison of two models for predicting the critical wind speeds required to damage coniferous trees . Ecol. Model. 129, 1 – 23.

66. Global Forest Watch. (Электронный ресурс), 2026. URL: https://www.globalforestwatch.org (дата обращения: 20.05.2025)
67. Grieser J. Convection parameters. Электронный ресурс: http://www.juergen-grieser.de/CovectionParameters/ConvectionParameters.pdf (дата обращения 10.01.2022).
68. Groenemeijer P., Púčik T., Holzer A.M., Antonescu B., Riemann-Campe K., Schultz D.M., 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. P. 2641–2651. DOI: 10.1175/BAMS-D-16-0067.1.
69. Gualtieri, Giovanni. (2022). Analysing the uncertainties of reanalysis data used for wind resource assessment: A critical review. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 167. 112741. 10.1016/j.rser.2022.112741.
70. Hanewinkel, M.: Neural networks for assessing the risk ofwindthrow on the forest division level: a case study in southwestGermany, Eur. J. Forest Res., 124, 243–249, 2005
71. Hahn, Thomas & Eggers, Jeannette & Subramanian, Narayanan & Toraño Caicoya, Astor & Uhl, Enno & Snäll, Tord. (2021). Specified resilience value of alternative forest management adaptations to storms. Scandinavian Journal of Forest Research. 36. 1-13. 10.1080/02827581.2021.1988140.
72. Hansen M.C. et al. High-Resolution Global Maps of 21st-Century Forest Cover Change // Science. 2013. V. 342. P. 850–853. DOI: 10.1126/science.1244693.
73. Hawker L., Uhe P., Paulo L., Sosa J., Savage J., Sampson C., Neal J. A 30 m global map of elevation with forests and buildings removed // Environmental Research Letters. 2022. V. 17. Art. No. 024016. DOI: 10.1088/1748-9326/ac4d4f.
74. Hart E., Sim K., Kamimura K., Meredieu C., Guyon D., Gardiner B. Use of machine learning techniques to model wind damage to forests // Agricultural and Forest Meteorology. 2019. V. 265. P. 16–29. DOI: 10.1016/j.agrformet.2018.10.022.

75. Hersbach H. et al. The ERA5 global reanalysis. Quarterly J. Royal Meteorol. Soc. 2020. V. 146, P. 1999-2049, DOI: 10.1002/qj.3803.
76. Hofherr, T.; Kunz, M. Extreme wind climatology of winter storms in Germany. Clim. Res. 2010,41, 105–123.
77. Hooker G., Mentch L. Zhou S. Unrestricted permutation forces extrapolation: variable importance requires at least one more model, or there is no free variable importance // Statistics and Computing. 2021. V. 31. Art. No. 82. DOI: 10.1007/s11222-021-10057-z.
78. Hongcheng Zeng, Ari Talkkari, Heli Peltola, Seppo Kellomäki, A GIS-based decision support system for risk assessment of wind damage in forest management, Environmental Modelling & Software, Volume 22, Issue 9, 2007
79. Ikonen, Veli-Pekka & Kilpeläinen, Antti & Strandman, Harri & Antti, Asikainen & Venäläinen, Ari & Peltola, Heli. (2020). Effects of using certain tree species in forest regeneration on regional wind damage risks in Finnish boreal forests under different CMIP5 projections. European Journal of Forest Research. 139. 10.1007/s10342-020-01276-6.
80. Iwahashi, Junko, Pike, Richard J. (2006) Automated classifications of topography from DEMs by an unsupervised nested-means algorithm and a three-part geometric signature. Geomorphology, 86 (3) 409-440 doi:10.1016/j.geomorph.2006.09.012
81. IPCC Climate change 2022: Impacts, adaptation, and vulnerability. Contribution of working group II to the Sixth assessment report of the intergovernmental panel on climate change. New York, Cambridge: Cambridge University Press, 2022. DOI: 10.1017/9781009325844
82. Kalinin, N.A., Shikhov, A.N., Bykov, A.V. Yarinich Yu.I., Chernokulsky A.V. Long-lived Severe Convective Windstorms in Northern Eurasia in 2022: Formation Environments and Short-term Forecasting Using the WRF Model. Russ. Meteorol. Hydrol. 2025. V. 50, P. 391–406. DOI: 10.3103/S1068373925050036

83. Kamimura, K., Shiraishi, N., 2007. A review of strategies for wind damage assessment in Japanese forests. J. For. Res. 12, 162–176
84. Kaplan J.O., Lau K.H.-K. The WGLC global gridded lightning climatology and time series. Earth Syst. Sci. Data. 2021. V. 13. P. 3219-3237. DOI: 10.5194/essd-13-3219-2021.
85. Kislov Dmitry, Korznikov Kirill. (2020). Automatic Windthrow Detection Using Very-High-Resolution Satellite Imagery and Deep Learning. Remote Sensing. 12. 1145. 10.3390/rs12071145.
86. Korznikov Kirill, Kislov Dmitry, Belyaeva Nadezhda. (2019). The first record of catastrophic windthrow in boreal forests of South Sakhalin and the South Kurils (Russia) during October 2015 tropical cyclones. Botanica Pacifica. 10.17581/bp.2019.08115.
87. Kramer, M. G., Hansen, A. J., Taper, M. L., & Kissinger, E. J. (2001). Abiotic controls on long-term windthrow disturbance and temperate rain forest dynamics in Southeast Alaska. Ecology, 82(10), 2749–2768. https://doi.org/10.2307/2679958
88. Krejci, L., Kolejka, J., Vozenilek, V., & Machar, I. (2018). Application of GIS to empirical windthrow risk model in mountain forested landscapes. Forests, 9, 96. https://doi.org/10.3390/F9020096
89. Kupfer J.A., Myers A.T., McLane S.E., Melton G.N., Patterns of forest damage in a southern Mississippi landscape caused by Hurricane Katrina, Ecosystems, 2008, Vol. 11(1), pp. 45–60, DOI: 10.1007/s10021-007-9106-z.
90. Laapas, M., Lehtonen, I., Venäläinen, A., & Peltola, H. (2019). 10-year return levels of maximum wind speeds under frozen and unfrozen soil forest conditions in Finland. Climate, 7, 62. https://doi.org/10.3390/cli7050062
91. Lindemann J.D., Baker W.L., Using GIS to analyse a severe forest blowdown in the Southern Rocky Mountains, International Journal of Geographical Information Science, 2002, V. 16(4), 377–399, DOI: 10.1080/13658810210136069

92. Lassig R., Mocalov S.A. Frequency and characteristics of severe storms in the Urals and their influence on the development, structure and management of the boreal forests // Forest Ecology and Management. 2000. V. 135. P. 179–194. DOI: 10.1016/S0378-1127(00)00309-1.
93. Lecina-Diaz, Judit & Martinez Vilalta, Jordi & Alvarez, Albert & Banqué-Casanovas, Mireia & Birkmann, Joern & Feldmeyer, Daniel & Vayreda, Jordi & Retana, Javier. (2020). Characterizing forest vulnerability and risk to climate-change hazards. Frontiers in Ecology and the Environment. 19. 10.1002/fee.2278.
94. Mart-Jan Schelhaas, Geerten Hengeveld, Marco Moriondo, Gert Jan Reinds, Zbigniew W. Kundzewicz, Herbert ter Maat, Marco Bindi Assessing risk and adaptation options to fires and windstorms in European forestry. Mitig Adapt Strateg Glob Change (2010) 15:681–701
95. Mikklesen , S.K. 2007 “ Stormfald ” : a further developed version of ForestGALES tested under Danish conditions . M.Sc. thesis , University of Copenhagen, Faculty of Life Sciences, Department of Forest and Landscape , Denmark
96. Mitchell S.J. Wind as a natural disturbance agent in forests: a synthesis // Forestry. 2013. V.86. P. 147–157. DOI: 10.1093/forestry/cps058.
97. Mortensen, N.G. , Heathfi eld , D.N. , Myllerup , L. , Landberg , L. and Rathmann , O. 2005 Wind Atlas Analysis and Application Program: WAsP 8 Help Facility and On-line Documentation. Risш National Laboratory , Roskilde, Denmark.
98. Pawlik, Ł., Harrison, S.P., 2022. Modelling and prediction of wind damage in forest ecosystems of the Sudety Mountains, SW Poland. Sci. Total Environ. 815, 151972. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.151972.
99. Pedregosa F., Varoquaux G., Gramfort A., Michel V., Thirion B., Grisel O. et al. Scikit-learn: Machine learning in Python. J. Machine Learning Res. 2011. V. 12. P. 2825–2830.

100. Pekel J.-F., Cottam A., Gorelick N., Belward A.S. High-resolution mapping of global surface water and its long-term changes // Natureю 2016. V. 540(7633). P. 418–422.
101. Peltola, H., Kellomäki, S., Väisänen, H., Ikonen, V.-P., 1999. A mechanistic model for assessing the risk of wind and snow damage to single trees and stands of Scots pine, Norway spruce, and birch. Can. J. For. Res. 29, 647–661.
102. 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
103. Potapov P. et al. Mapping and monitoring global forest canopy height through integration of GEDI and Landsat data // Remote Sensing of Environment. 2020. Art. No. 112165. DOI: 10.1016/j.rse.2020.112165.
104. Potapov P., Turubanova S., Hansen M.C., Tyukavina A., Zalles V., Khan A., Song X.-P., Pickens A., Shen Q., Cortez J. Global maps of cropland extent and change show accelerated cropland expansion in the twenty-first century // Nature Food. 2021. doi: 10.1038/s43016-021-00429-z
105. Potterf, Maria & Eyvindson, Kyle & Blattert, Clemens & Triviño, María & Burner, Ryan & Burgas, Daniel & Monkkonen, Mikko. (2023). Diversification of forest management can mitigate wind damage risk and maintain biodiversity. European Journal of Forest Research. 143. 10.1007/s10342-023-01625-1.
106. Quine C.P.; Coutts M.P.; Gardiner B.A.; Pyatt, D.G. 1995. **Forests and Wind**: **Management to Minimise Damage**. Bulletin 114. HMSO, London, viii + 27pp.
107. Rasmussen E.N., Blanchard D.O. A Baseline Climatology of Sounding-Derived Supercell and Tornado Forecast Parameters // Wea. Forecasting. 1998. vol. 13. pp. 1148–1164.
108. Rubin J. Optimal Classification into Groups: An approach for Solving the Taxonomy Problem // Theoretical Biology. 1967.15. P. 103-144.
109. Saarinen N, Vastaranta M, Honkavaara E, Wulder M.A, White J.C, Litkey P, Holopainen M, Hyyppä J. (2016). Using multi-source data to map and model

the predisposition of forests to wind disturbance. Scandinavian Journal of Forest Research, 31 (1), 66–79.

110. Sanchez P.A. et al. Digital Soil Map of the World // Science. 2009. V. 325. P. 680-681. DOI:10.1126/science.1175084

111. Santoro M. GlobBiomass - global datasets of forest biomass. PANGAEA, 2018. Электронный ресурс: https://doi.org/10.1594/PANGAEA.894711 (дата обращения 30.01.2025).

112. Seidl Rupert, Paulo M. Fernandes, Teresa F. Fonseca, Francois Gillet, Anna Maria Jonsson, Katarina Merganicova, Sigrid Netherer, Alexander Arpaci, Jean-Daniel Bontemps, Harald Bugmann, Jose Ramon Gonzalez-Olabarria, Petra Laschn, Celine Meredieu, Francisco Moreira, Mart-Jan Schelhaas, Frits Mohren, Modelling natural disturbances in forest ecosystems: a review, Ecological Modelling 222 (2011) 903–924

113. Senf C., Seidl R. Storm and fire disturbances in Europe: Distribution and trends // Glob Change Biol. 2021. V. 27. P. 3605–3619.

114. 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) // International Journal of Biometeorology. 2012. V. 56. P. 57–69. DOI: 10.1007/s00484-010-0397-y.

115. Shapiro, S. S.; Wilk, M. B. (1965). "An analysis of variance test for normality (complete samples)". Biometrika. 52 (3–4): 591–611. doi:10.1093/biomet/52.3-4.591. JSTOR 2333709. MR 0205384. p. 593

116. Shikhov A. N., Yarinich Y. I., Chernokulsky A. V. Association Of Spatial And Temporal Windthrow Distribution With Convective Parameters And Lightning Density In Russia. Geography, Environment, Sustainability. 2025. V.1. P. 75–88. DOI: 10.24057/2071-9388-2025-3590.

117. Stritih, A., Senf, C., Seidl, R., Gret-Regamey, A., Bebi, P., 2021. The impact of land-use legacies and recent management on natural disturbance susceptibility in mountain forests. For. Ecol. Manage. 484, 118950. https://doi.org/10.1016/j. foreco.2021.118950

118. Suvanto, S., Henttonen, H.M., Nöjd, P., Mäkinen, H., 2016. 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. For. Ecol. Manag. 381, 17–28.

119. 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. DOI: 10.1016/j.foreco.2019.117619.

120. Taszarek M., Allen J.T., Púcik T., Hoogewind K.A., and Brooks H.E. (2020b). Severe convective storms across Europe and the United States. Part II: ERA5 environments associated with lightning, large hail, severe wind, and tornadoes. J. Clim. 2020. V. 33(24). P. 10263–10286. DOI: 10.1175/JCLI-D-20-0346.1.

121. Taszarek M., Allen J.T., Marchio M. et al. Global climatology and trends in convective environments from ERA5 and rawinsonde data. npj Climate and Atmospheric Sciences. 2021. V.4. Art. No. 35. DOI: 10.1038/s41612-021-00190-x.

122. Tyukavina A., Potapov P., Hansen M.C., Pickens A., Stehman S., Turubanova S., Parker D., Zalles V., Lima A., Kommareddy I., Song X-P, Wang L. Harris N. Global trends of forest loss due to fire, 2001-2019 // Frontiers Rem. Sens. 2022. DOI: 10.3389/frsen.2022.825190.

123. Ulanova N.G. The effects of windthrow on forests at different spatial scales: a review // Forest Ecology and Management. 2000. V. 135. P. 155–167. DOI: 10.1016/S0378-1127(00)00307-8

124. USGS EarthExplorer. (Электронный ресурс). URL: https://earthexplorer.usgs.gov/

125. Valta H, Lehtonen I, Laurila TK, Venäläinen A, Laapas M, Gregow H (2019) Communicating the amount of wind-storm induced forest damage by the maximum wind gust speed in Finland. Adv Sci Res 16:31–37. https:// doi. org/ 10. 5194/ asr- 16- 31- 2019

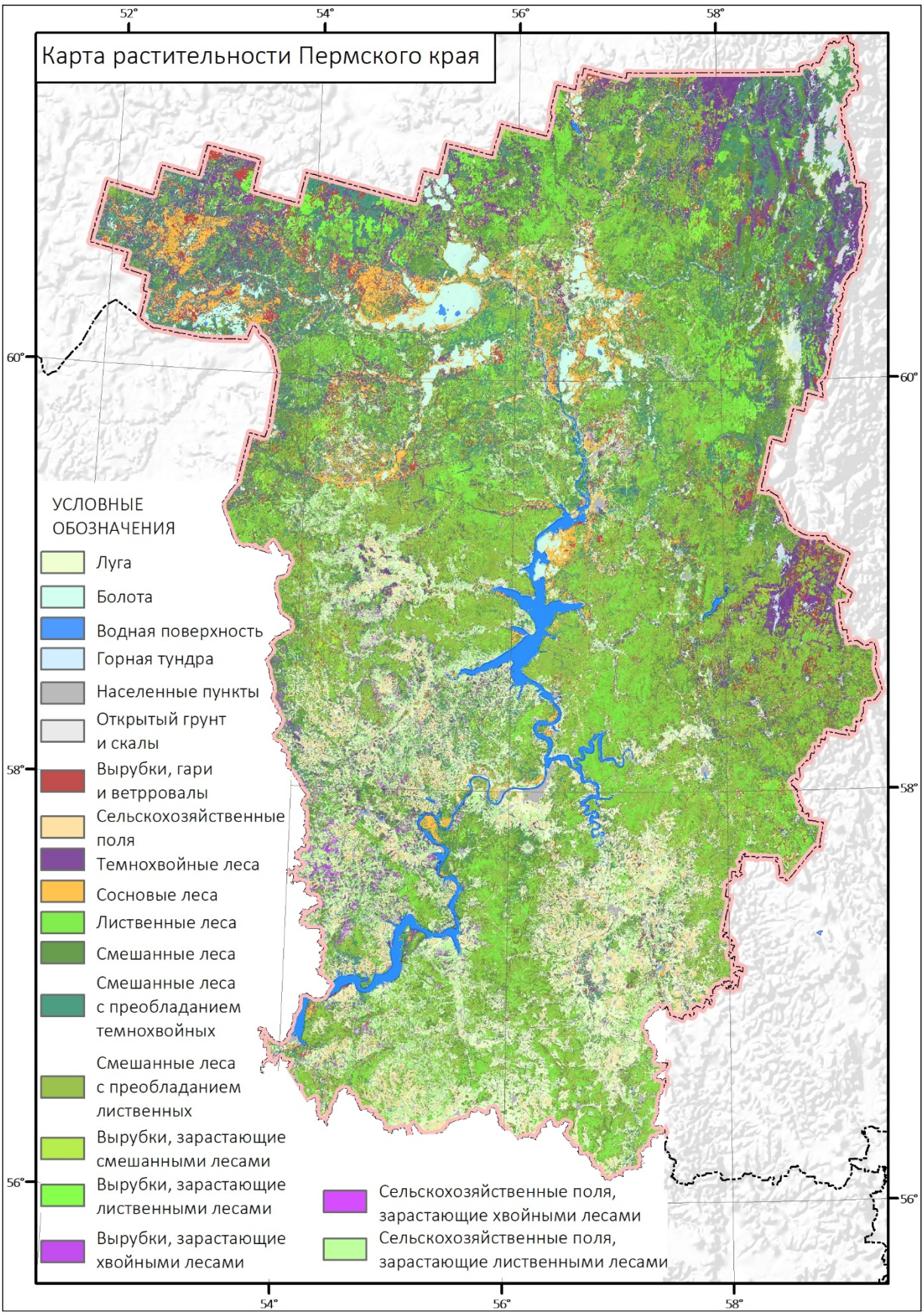
126. Venäläinen A., Laapas M., Pirinen P., Horttanainen M., Hyvönen R., Lehtonen I., Junila P., Hou M., Peltola H.M. Estimation of the high-resolution variability of extreme wind speeds for a better management of wind damage risks to forest-based bioeconomy // Earth Syst. Dyn. 2017. V. 8. P. 529–545. DOI: 10.5194/esd-8-529-2017.

127. Venäläinen A., Lehtonen I., Laapas M., Ruosteenoja K., Tikkanen O-P., Viiri H., Ikonen V.P, Peltola H. Climate change induces multiple risks to boreal forests and forestry in Finland: A literature review // Glob. Change Biol. 2020. V. 26(8). P. 4178-4196, DOI: 10.1111/gcb.15183.

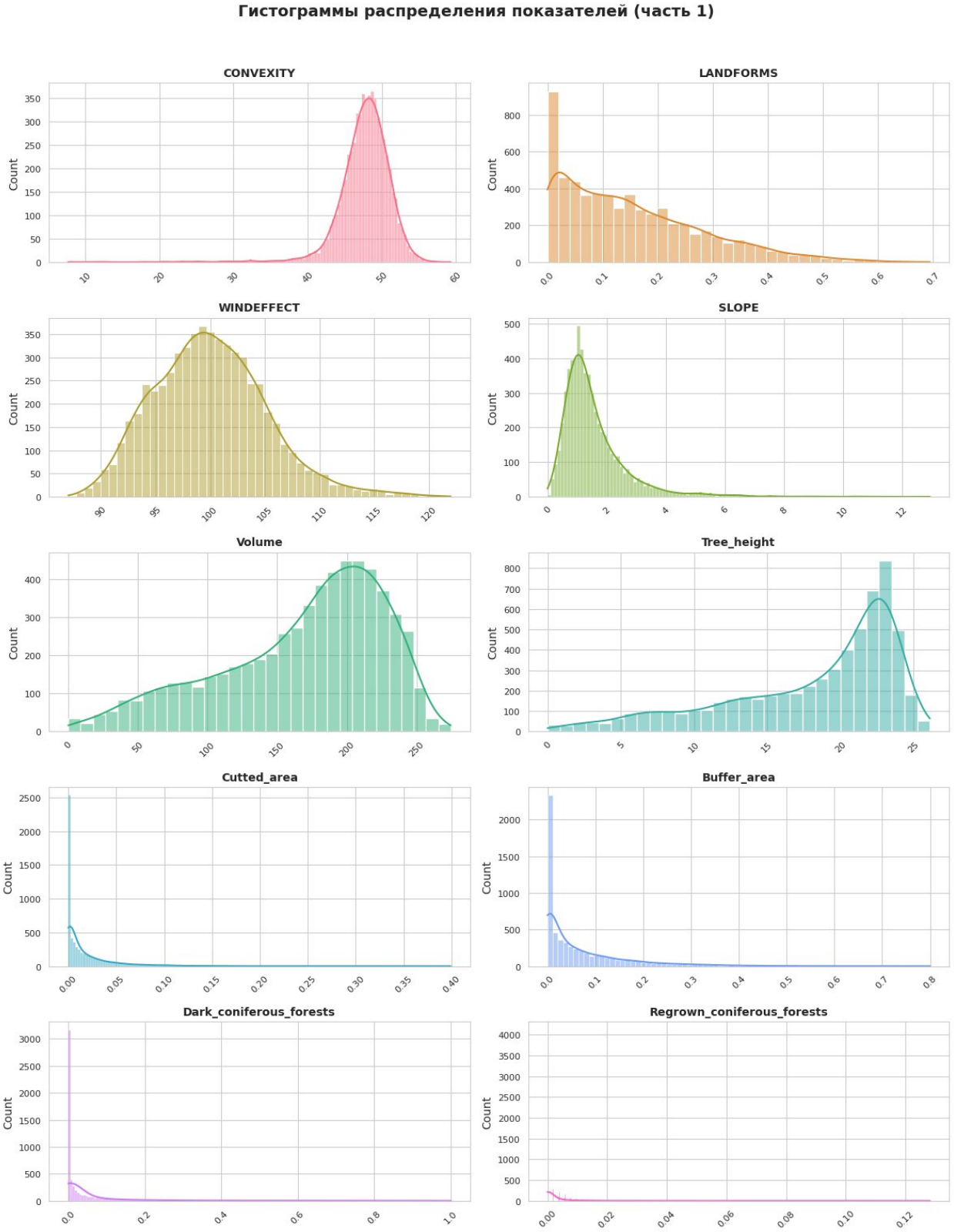
128. Zhang, Xiao & Zhao, Tingting & Xu, Hong & Wendi, Liu & Wang, Jinqing & Chen, Xidong & Liu, Liangyun. (2024). GLC_FCS30D: the first global 30 m land-cover dynamics monitoring product with a fine classification system for the period from 1985 to 2022 generated using dense-time-series Landsat imagery and the continuous change-detection method. Earth System Science Data. 16. 1353-1381. 10.5194/essd-16-1353-2024.

ПРИЛОЖЕНИЯ

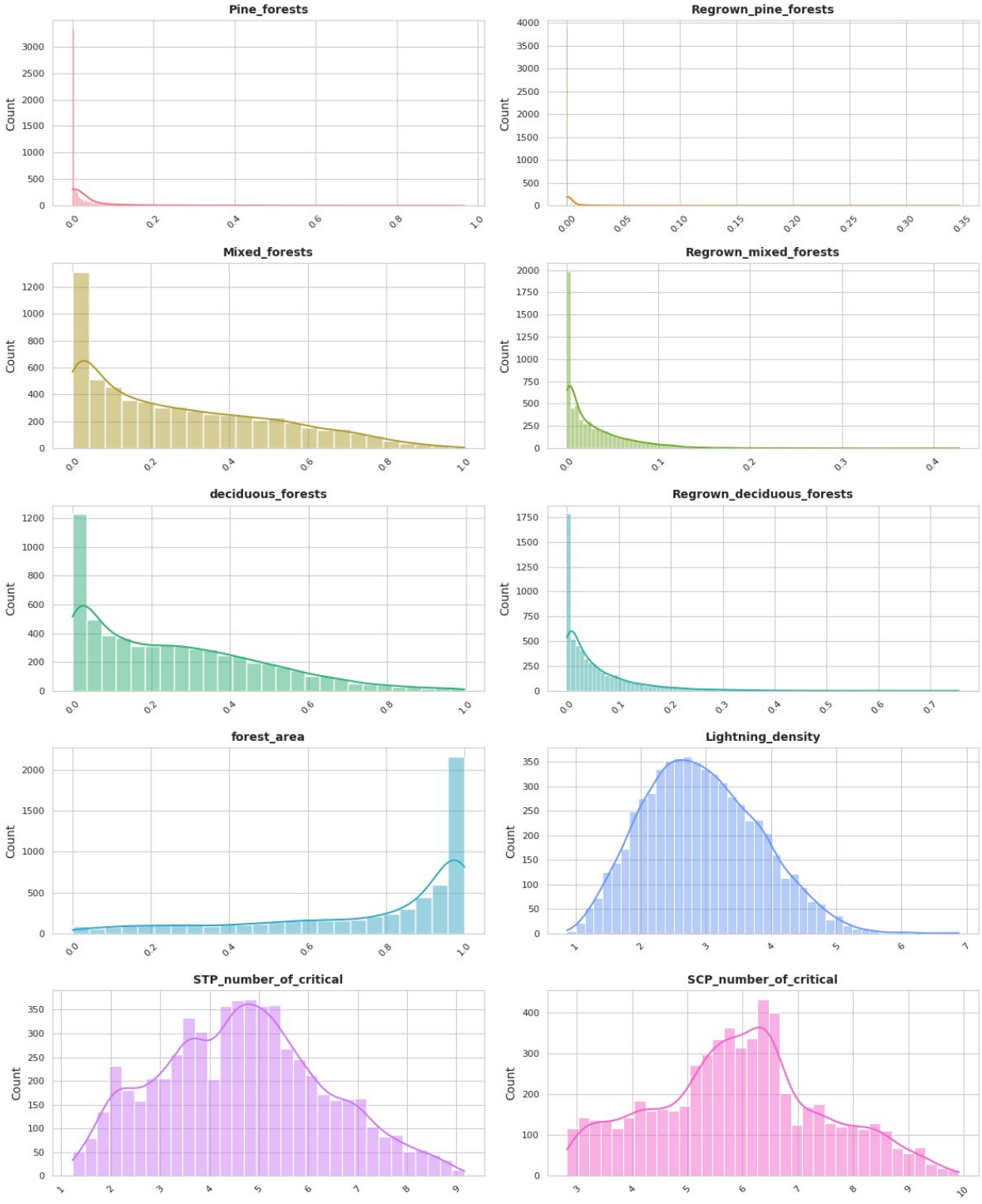
Приложение 1. Карта растительности Пермского края



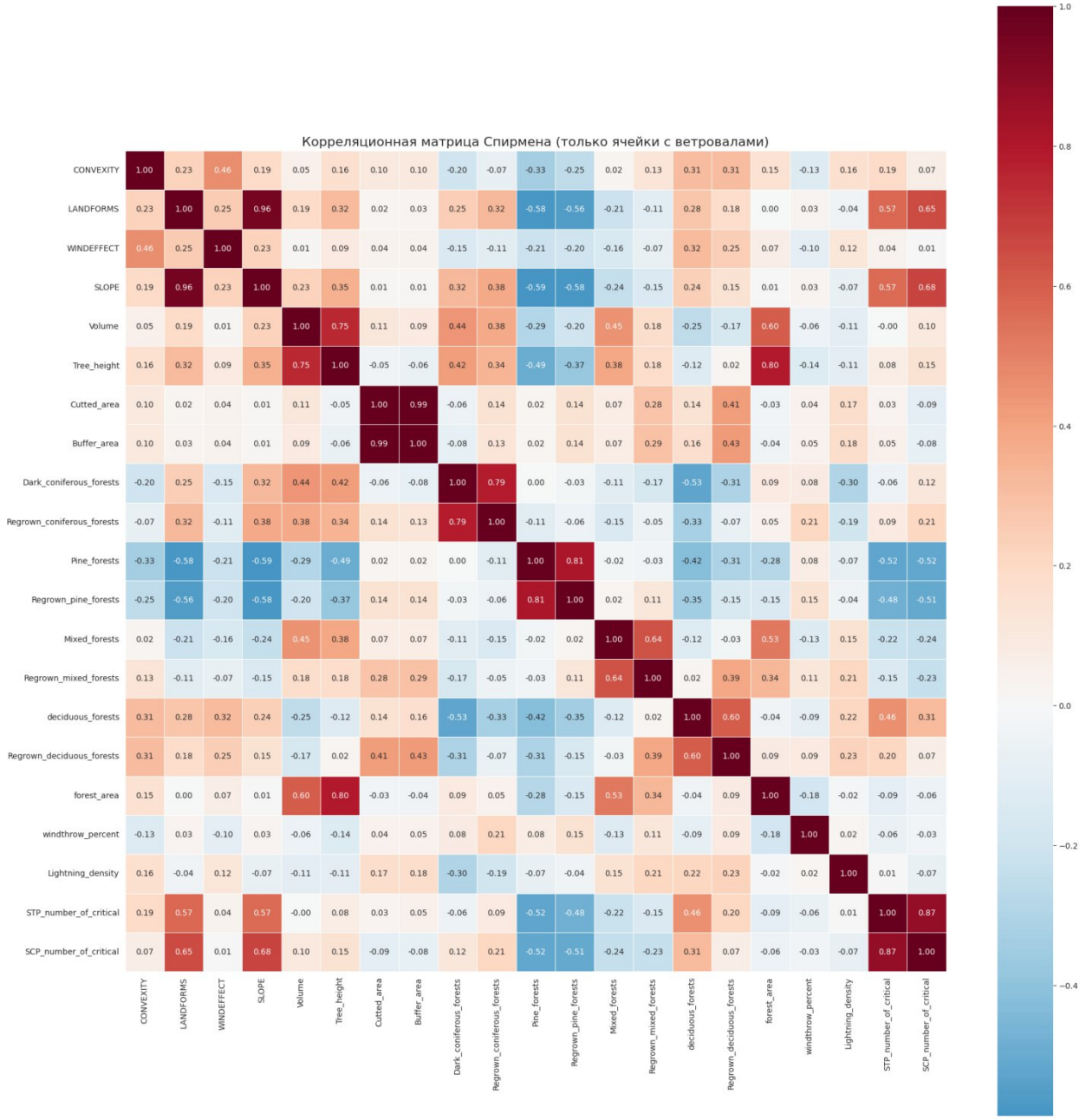
Приложение 2. Гистограммы распределения предикторов ветровалов



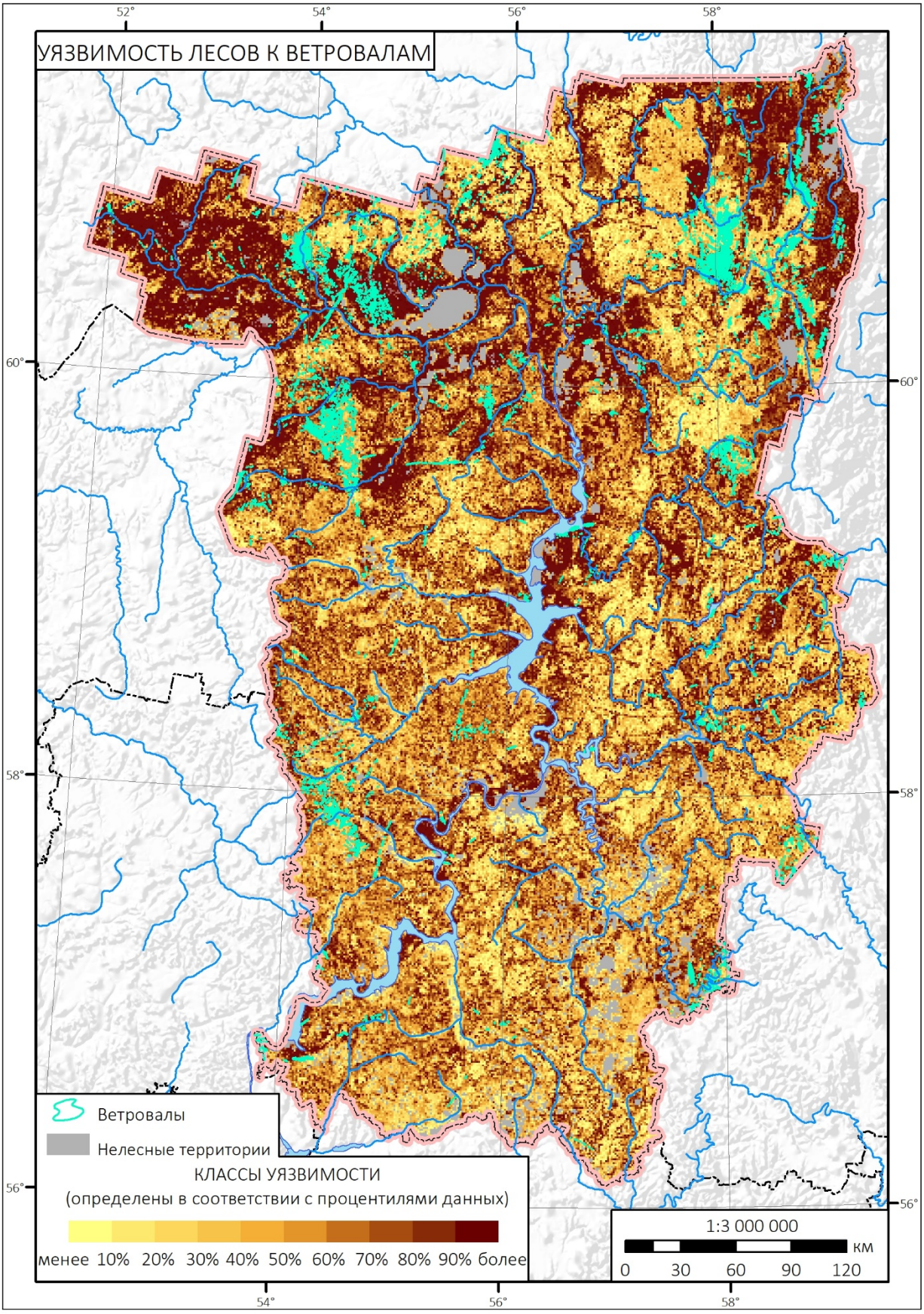
Гистограммы распределения показателей (часть 2)



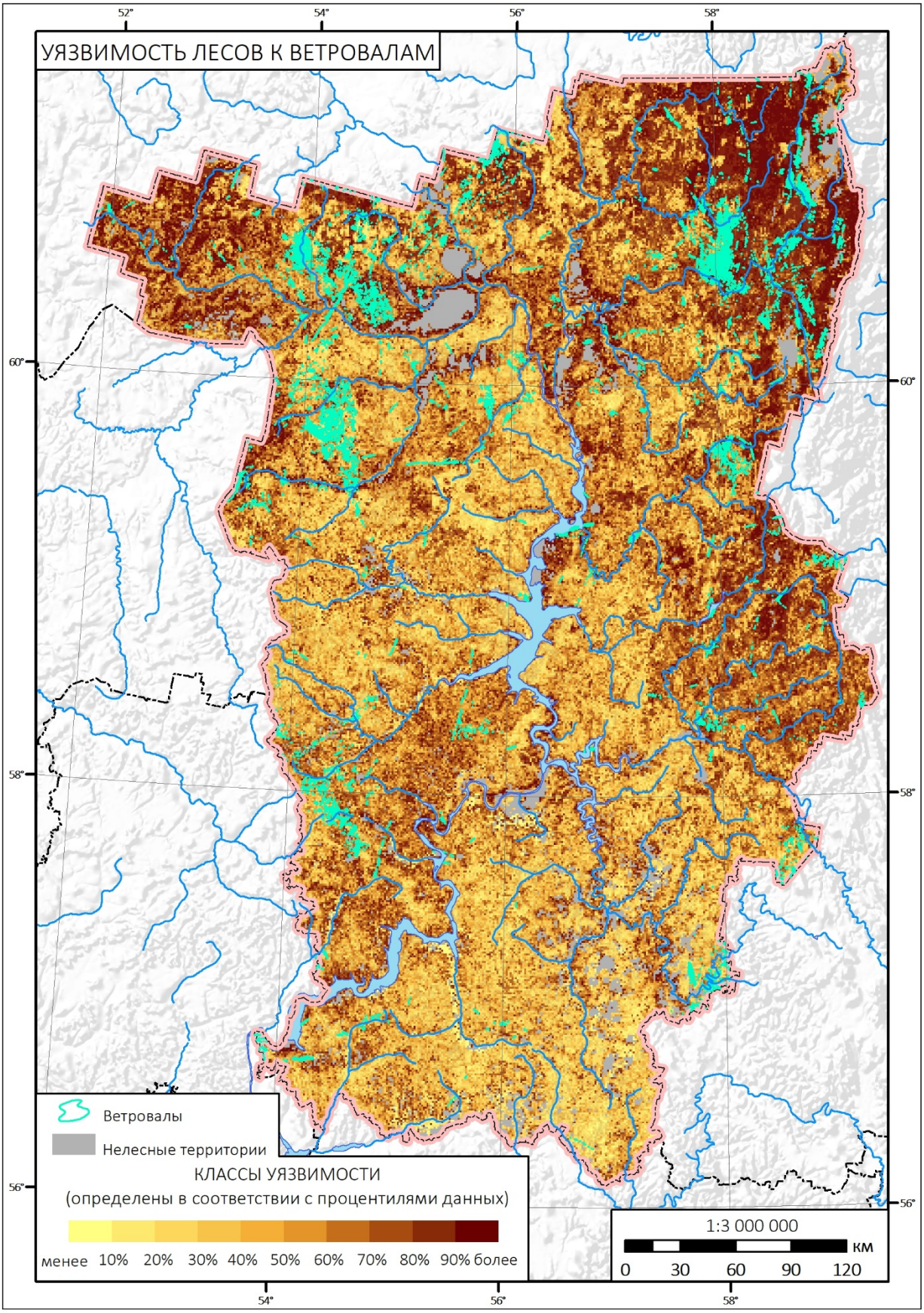
Приложение 3. Тепловая карта матрицы корреляции для всех ячеек с ветровалами (коэффициент Спирмена)



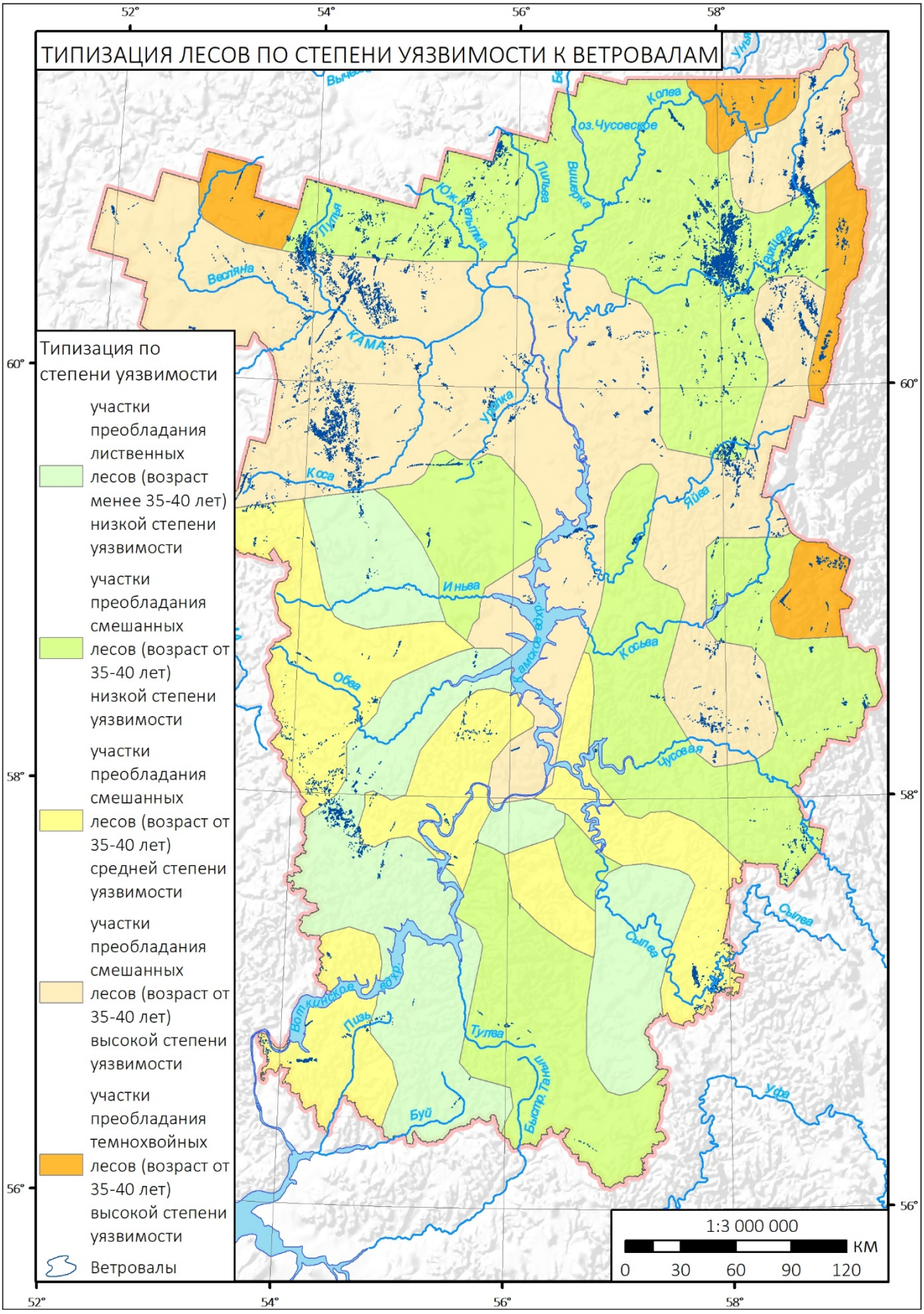
Приложение 4. Карта уязвимости лесов Пермского края к ветровалам (на основе карты растительности Пермского края)



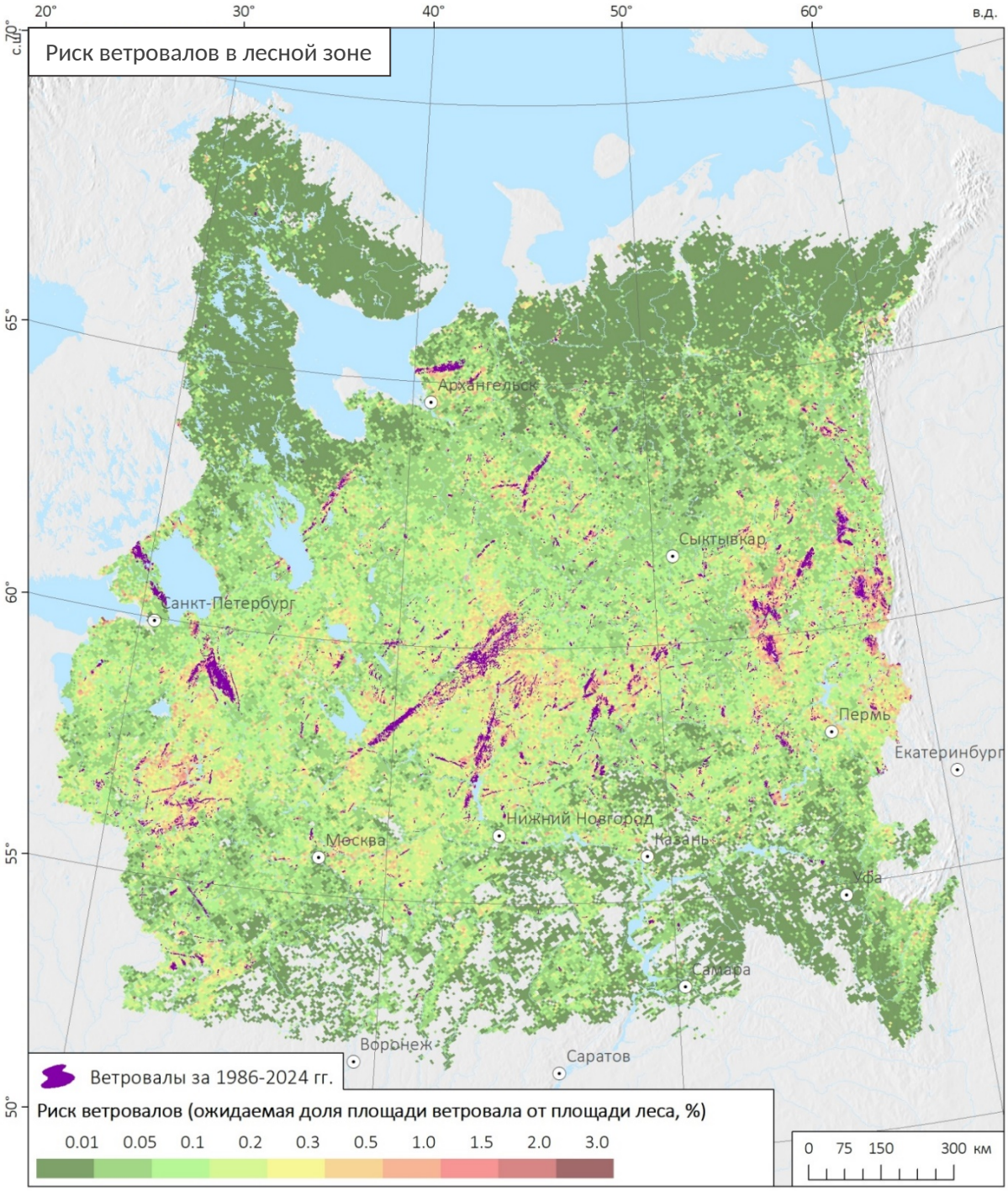
Приложение 5. Карта уязвимости лесов Пермского края к ветровалам (на основе глобальной карты растительности)



Приложение 6. Типизация лесов Пермского края по степени уязвимости к ветровалам



Приложение 7. Расчетный риск ветровалов в лесной зоне ЕТР по данным модели случайного леса



Приложение 8. Расчетный риск ветровалов в лесной зоне ЕТР по данным модели градиентного бустинга

