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

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата географических наук

Пермь 2026

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Пермский государственный национальный исследовательский университет».

Научный руководитель – доктор географических наук, доцент Шихов Андрей Николаевич.

Официальные оппоненты:

1. **Мальцев Кирилл Александрович,** доктор географических наук, доцент, заведующий кафедрой ландшафтной экологии Института экологии, биотехнологии и природопользования Казанского (Приволжского) федерального университета
2. **Подольская Екатерина Сергеевна**, кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник ФГБУН «Центр по проблемам экологии и продуктивности лесов им. А.С. Исаева Российской академии наук (ЦЭПЛ РАН)»

Ведущая организация – Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт космических исследований Российской академии наук (ИКИ РАН)

Защита диссертации состоится 28 января 2027 г. в 13 часов 30 минут на заседании диссертационного совета 24.2.358.04, созданного на базе ФГАОУ ВО «Пермский государственный национальный исследовательский университет», по адресу: 614068, г. Пермь, ул. Генкеля, д.8, Географический факультет, ауд. 527.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте https://psu.ru/science/dissertation-councils/geograficheskie-nauki/semakina-anastasiya-vladimirovna/

Автореферат разослан _____ 2026 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета А.А. Поморцева

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

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 – 11.

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.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

1-е защищаемое положение: Созданная карта растительности Пермского края с пространственным разрешением 30 м обеспечивает необходимую пространственную и тематическую детальность для оценки уязвимости лесов к ветровому воздействию.

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. Существующие карты растительного покрова не отвечают требованиям к пространственной и тематической детальности, а данные лесоустройства имеют гриф «для служебного пользования».

Для территории Пермского края было создано безоблачное покрытие снимками Landsat, полученными в летний период. 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.

Первым шагом при классификации является определение тематических классов. В качестве основы для построения легенды использовались данные карты растительности России (Барталев и др., 2016). Для территории Пермского края были определены 14 тематических классов, включая 6 классов лесной растительности и 8 классов нелесных территорий (табл. 1). Обучающая выборка формировалась с учетом данных карты растительности России, а также известных дешифровочных признаков основных типов растительного покрова, включая леса различного породного состава (Шихов и др., 2020).

Таблица 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 результатов классификации включала этапы выделения новых классов и корректировки существующих на основе тематических продуктов: Global Forest Change, Eastern’Europe Forest Cover Change, Global Surface Water, Global Cropland Expansion, данных о зарастающих древесной растительностью пахотных землях (Белоусова, Брыжко., 2021). Результирующая карта представлена на рис. 1.

Верификация созданной карты выполнена по нескольким источникам данных. Проведено сравнение данных, полученных в результате классификации с данными карты растительности России (Барталев и др., 2011; Барталев и др., 2016), полученными за 2018 г. 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%, но 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.

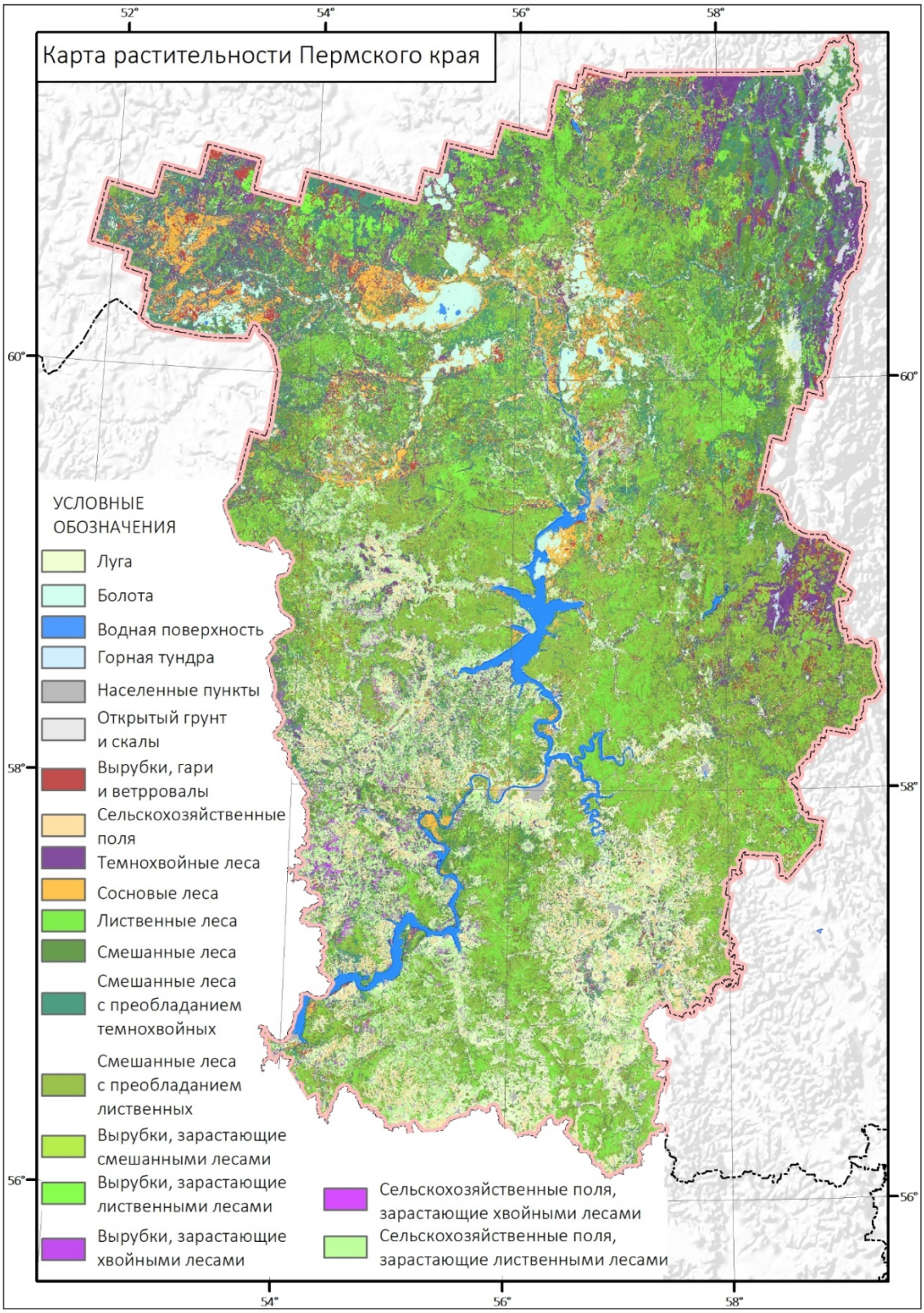

Рис.1. Карта растительности Пермского края

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. Для сопоставления с результатами классификации на основе формулы состава древостоя были выделены классы темнохвойных, сосновых, смешанных и лиственных лесов.

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. Такие расхождения могут быть связаны с тем, что при классификации также был выделен класс смешанных лесов с преобладанием темнохвойных (которые в проверочных данных отсутствуют). 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%.

2-е защищаемое положение: 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.

Уязвимость лесов к воздействию сильных ветров определяется параметрами насаждения, характеристиками местоположения и характером лесопользования (Шихов и др., 2023). При формировании базы данных предикторов использовались данные о ветровалах, произошедших в лесной зоне ЕТР. Для формирования обучающего набора данных выбраны 7 случаев крупных ветровалов, которые произошли в разных частях лесной зоны ЕТР.

Преобладающие породы в древостое были определены на основе классификации последнего предшествующего ветровалу безоблачного снимка со спутника Sentinel-2. Помимо лесообразующих пород, оценивались также высота древостоя по данным Global Forest Canopy Height и запас древесины по данным GlobBiomass. 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. Среди характеристик рельефа рассмотрены высота местности, уклон, выпуклость склона (Convexity), доля площади положительных форм рельефа на основе классификации форм рельефа и параметр Wind Effect (коэффициент усиления или ослабления ветра на наветренных и подветренных склонах).

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 рассматривалась доля площади ветровала от площади леса в ячейке, а в качестве предикторов – 16 характеристик лесных насаждений и рельефа, определяющих уязвимость лесов. Данные были представлены в виде таблицы, где каждой ячейке сетки соответствовали 16 значений предикторов и значение предиктанта. Анализ данных включал построение корреляционной матрицы на основе коэффициентов корреляции (R) Спирмена с уровнем значимости равным 0,05. Также выполнена оценка значимости предикторов и методом случайного перемешивания значений каждого признака (permutation importance). Обе оценки приведены в табл. 2.

Таблица 2. Коэффициенты корреляции (R) Спирмена между предиктантом и предикторами, и результаты оценки значимости предикторов

Переменная	R Спир-мена	Значимость предиктора в Random Forest	
		Стандартная	Методом permutation importance
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

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. 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.

3-е защищаемое положение: 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.

Для оценки уязвимости лесов Пермского края к ветровому воздействию создана модель машинного обучения на основе метода случайного леса. Оценка уязвимости лесов к ветровому воздействию была проведена на основе тех же предикторов, как и в обучающей выборке, и той же структуры данных. Однако площадь ячейки расчетной сетки была увеличена до 1 км^2, в результате объем выборки составил 160,9 тыс. ячеек. Изменение пространственного разрешения для территории Пермского края с 500 м до 1 км обусловлено большой площадью территории и затратами на вычисление характеристик предикторов в ячейках сетки.

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 (рис. 2). 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 (рис 2.) и сопоставлены с фактическим распределением ветровалов по территории края за период с 1986 по 2023 гг.

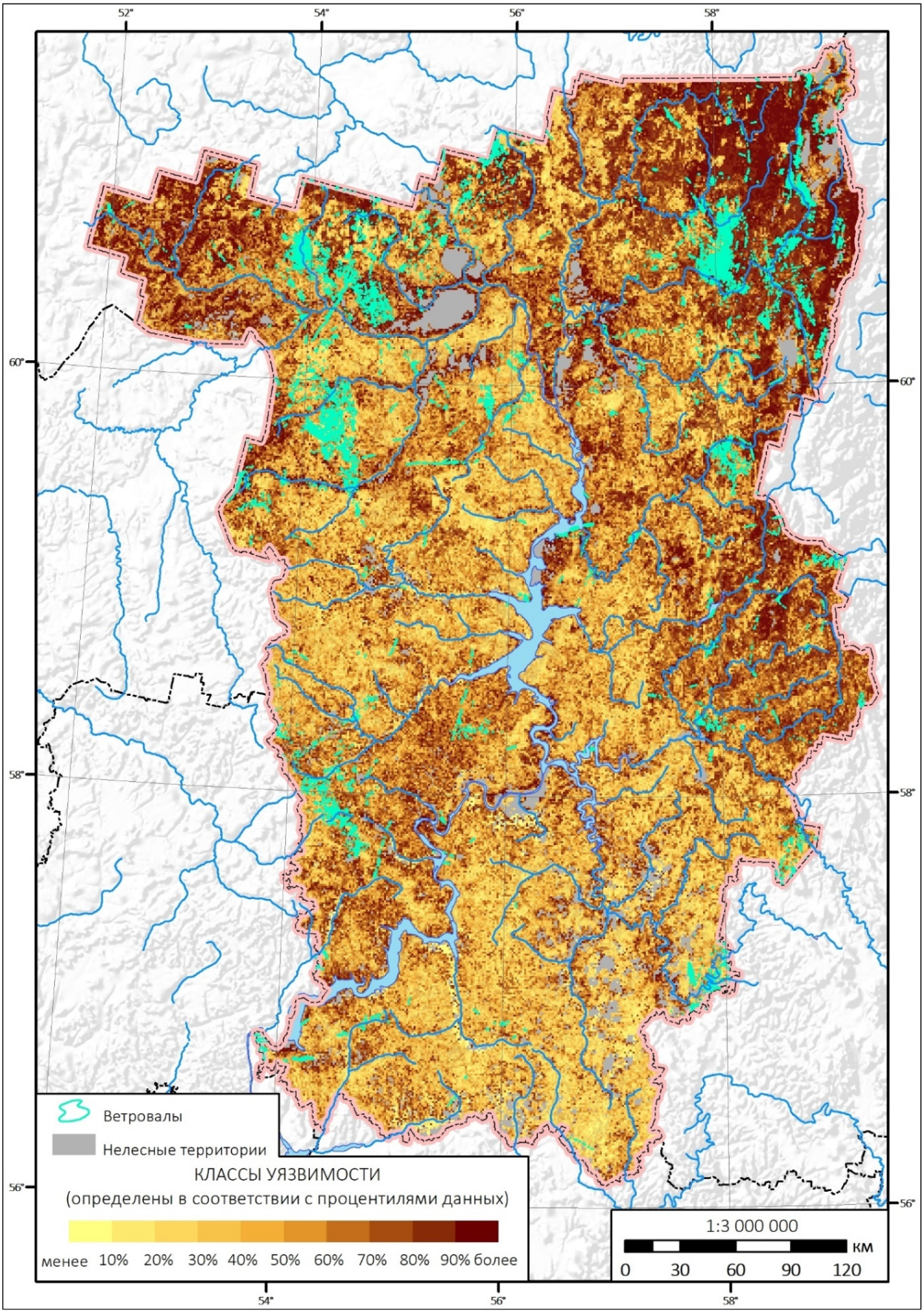

Рис. 2. Карта уязвимости лесов Пермского края к ветровалам

Среднее значение ожидаемой доли площади ветровала от площади леса при равномерном ветровом воздействии на всю территорию составляет 11,1%, тогда как фактическая доля площади ветровалов от площади лесов – всего 0,43%. Такое расхождение обусловлено тем, что ветровое воздействие, способное вызвать сплошной ветровал 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. Наиболее высокую оценку уязвимости получили северо-западные районы с преобладанием сосновых лесов и участки первичных темнохвойных лесов на северо-востоке края. В центральной и южной части края наибольшую оценку уязвимости также имеют сосновые леса и небольшие участки сохранившихся темнохвойных лесов. Обширные площади вторичных лиственных лесов на всей территории края отнесены к классу с очень низкой уязвимостью, и фактически здесь ветровалы наблюдаются крайне редко даже в районах, где доля лесопокрытой площади составляет 70-90%.

Для количественной оценки рассчитаны R Спирмена между расчетной и фактической долей площади ветровала. При расчете по исходной выборке R достаточно низкий (0,10), хотя и статистически значимый. Такая низкая корреляция обусловлена тем, что при расчете уязвимости лесов не учитывается фактор неоднородности ветрового воздействия по территории. 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 (рис. 3). Такая оценка выполнена для результатов классификации на 10 классов и на 100 классов, обе классификации выполнены методом квантилей по величине 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. 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, ветровалы маловероятны даже при очень сильном ветровом воздействии.

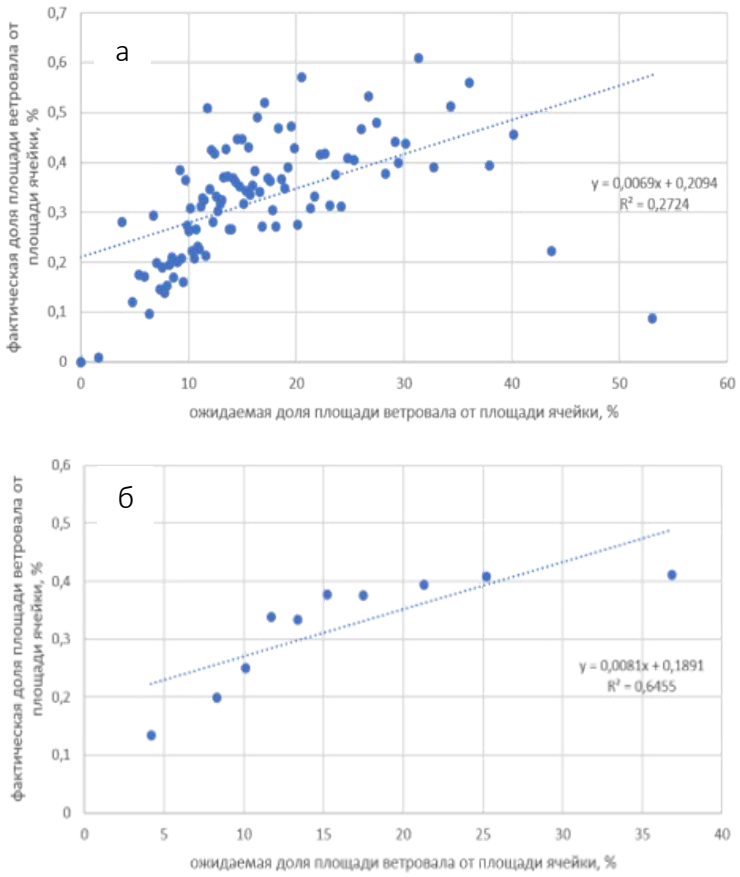

Рис. 3. Зависимость фактической и расчетной (на основе карты растительности GLC-FCS30) площади ветровала при агрегировании данных на 100 групп (а) и на 10 групп (б)

На основе наиболее значимых факторов уязвимости проведена типизация лесов Пермского края по условиям возникновения ветровалов. На территорию края была построена расчетная сетка с размером ячейки 5000 м и для каждой ячейки сетки определена преобладающая порода, рассчитана доля площади, покрытой лесом и среднее значение уязвимости лесов к ветровалам. Определение границ типов с разными условиями возникновения ветровалов проводилось в ГИС SAGA с помощью инструмента кластерного анализа с пространственными ограничениями (Cluster Analysis (Table Fields)). В результате были выделены границы 5 основных типов с разными условиями формирования ветровалов, которые включают в себя районы преобладания лиственных, смешанных и темнохвойных лесов разной степени уязвимости к ветровалам (рис. 4).

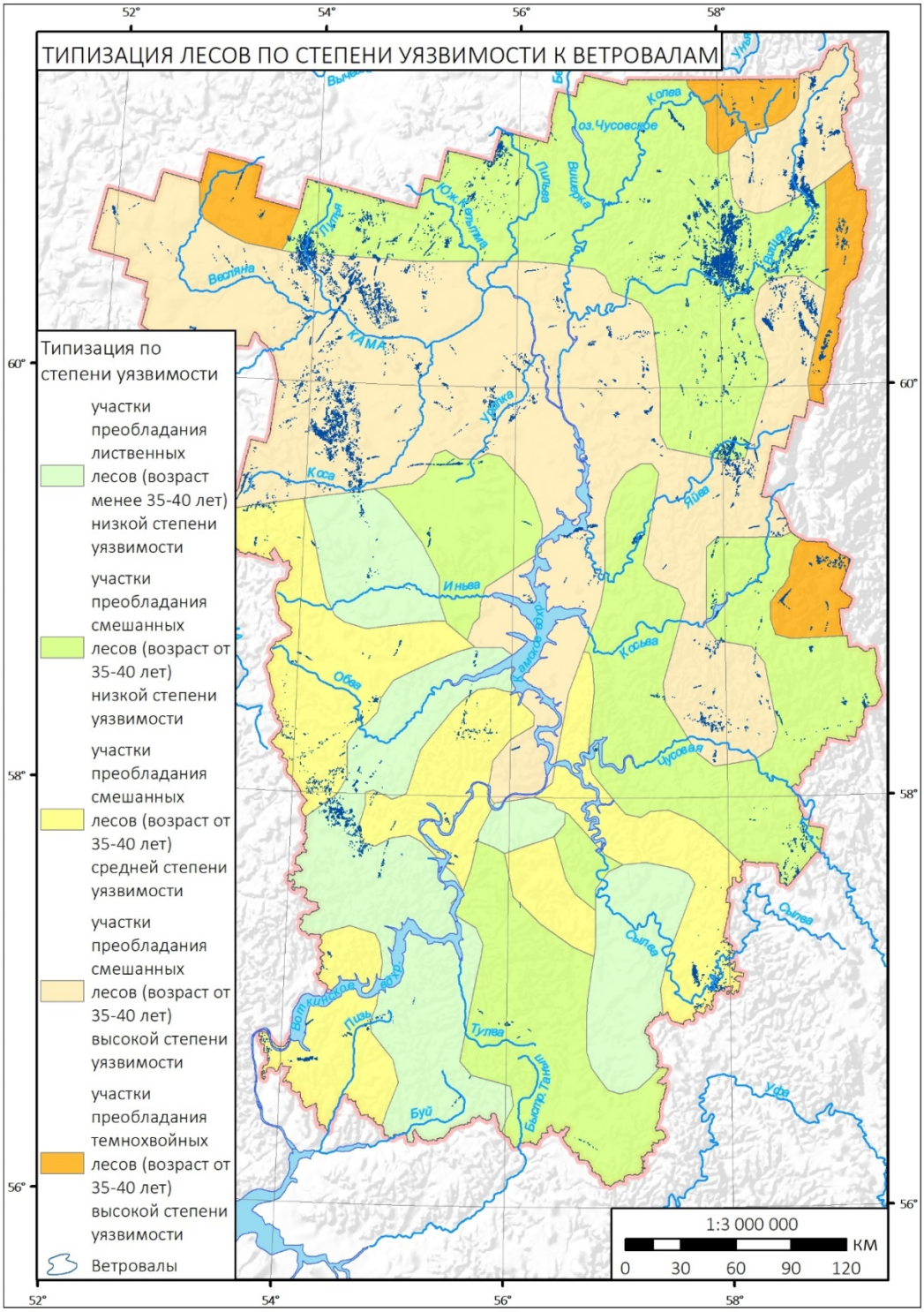

Рис. 4. Карта типизации лесов Пермского края по степени уязвимости к ветровалам

Для прогнозирования риска ветровалов в лесной зоне ЕТР были применены два современных ансамблевых алгоритма машинного обучения Random Forest Regressor и XGBoost Regressor (рис. 5). 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: все элементы выборки были пять раз разделены на обучающие и проверочные данные в соотношении

80% на 20% таким образом, чтобы проверочные выборки не пересекались. Таким образом, в совокупности эти пять проверочных наборов составляют весь набор данных. Далее из обучающих выборок были исключены 1% ячеек с наибольшей долей площади ветровала от площади леса. Их исключение было необходимо, поскольку на участках наиболее крупных ветровалов согласно карте лесов по состоянию на 2023 г. широко распространены молодняки − леса, которые выросли уже после ветровала. Учет таких участков приводит к некорректной оценке значимости предикторов. Также 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 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

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 ветровалы не встречаются.

Выделяется несколько максимумов расчетного риска: максимум на западных склонах Северного Урала в пределах Пермского края, где распространены первичные темнохвойные леса. Однако к северу расчетный риск ветровалов значительно уменьшается, что обусловлено, снижением значений предикторов возникновения шквалов и смерчей. Высокий риск ветровалов также характерен для северной части Нижегородской, Костромской, Кировской областей и северо-запада Пермского края, что соответствует данным наблюдений. Для этой территории характерно сочетание высокой доли площади леса и высоких значений климатических предикторов. Аналогичные особенности характерны и для части территории Тверской и Новгородской областей. 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. Лиственные леса на юге и юго-западе территории также характеризуются низким риском ветровалов.

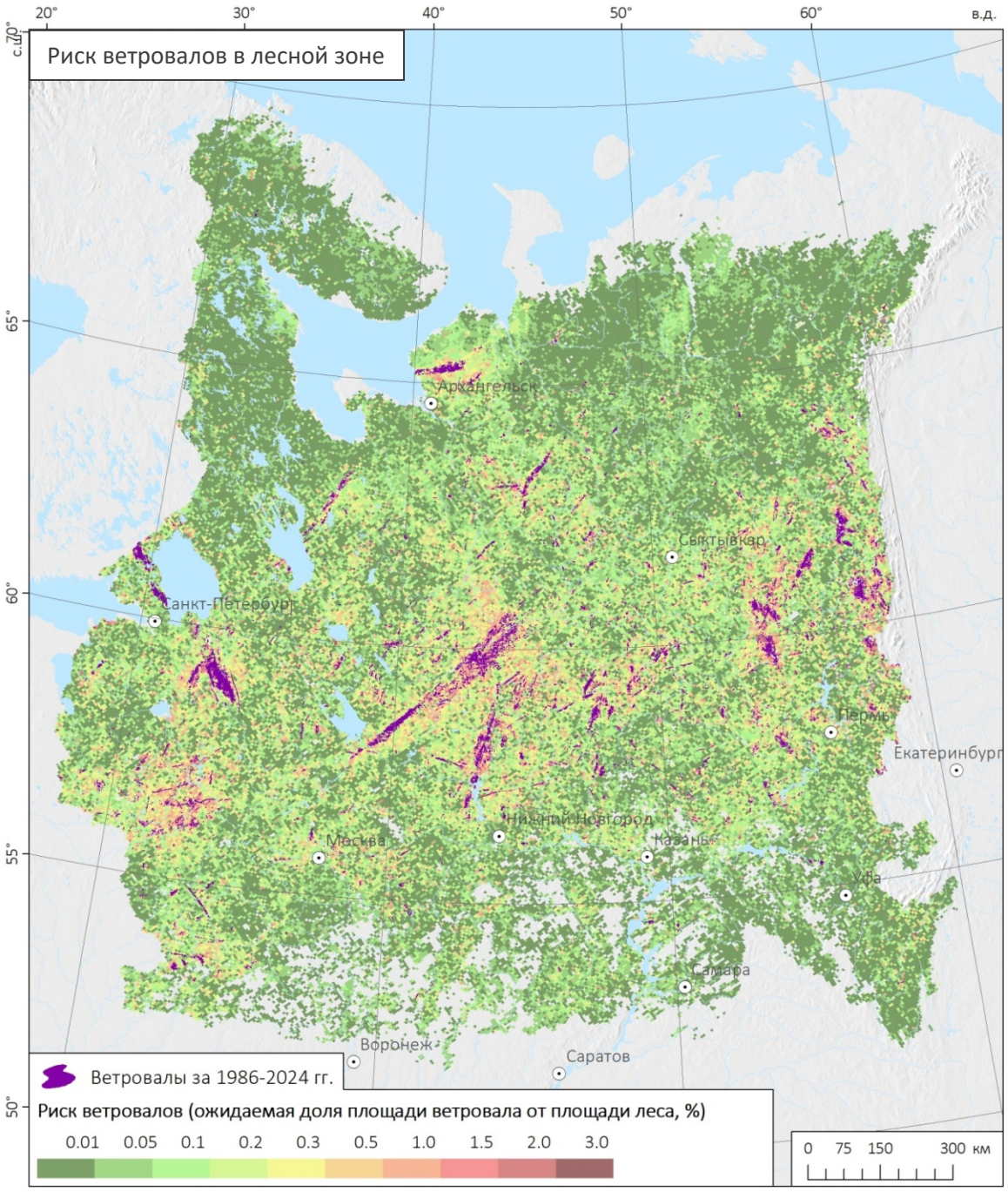

Рис.5. Расчетный риск ветровалов по данным модели градиентного бустинга

Количественная оценка проведена путем расчета корреляции между ожидаемой и фактической долей площади ветровалов. Для результата, полученного методом случайного леса, при расчете по исходным ячейкам сетки 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. 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. 6). В данном случае также выявлена умеренная корреляция: для модели случайного леса R^2=0.26, а для градиентного бустинга R^2=0,32, но меньший объем выборки позволяет лучше увидеть закономерности. В частности, выделяется несколько точек с очень большой фактической площадью ветровала, но с умеренной оценкой риска. Это ячейки, подвергшиеся воздействию разрушительных шквалов 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, но с нулевым значением фактической площади. Она приурочена к области с высоким расчетным риском на Южном Урале, 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.

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. 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. Средняя фактическая доля площади ветровала в ячейке составила 0,4%, тогда как ожидаемая доля площади ветровала 0,3%.

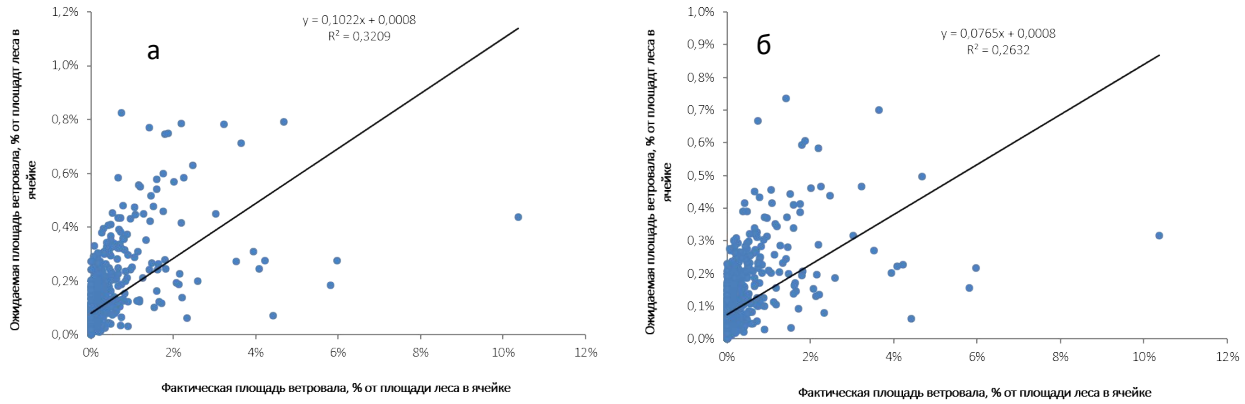

Рис. 6. Зависимость между фактической площадью ветровала и ожидаемой долей площади ветровалов от площади леса, рассчитанная для ячеек 50×50км: градиентный бустинг (а) и случайный лес (б)

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.

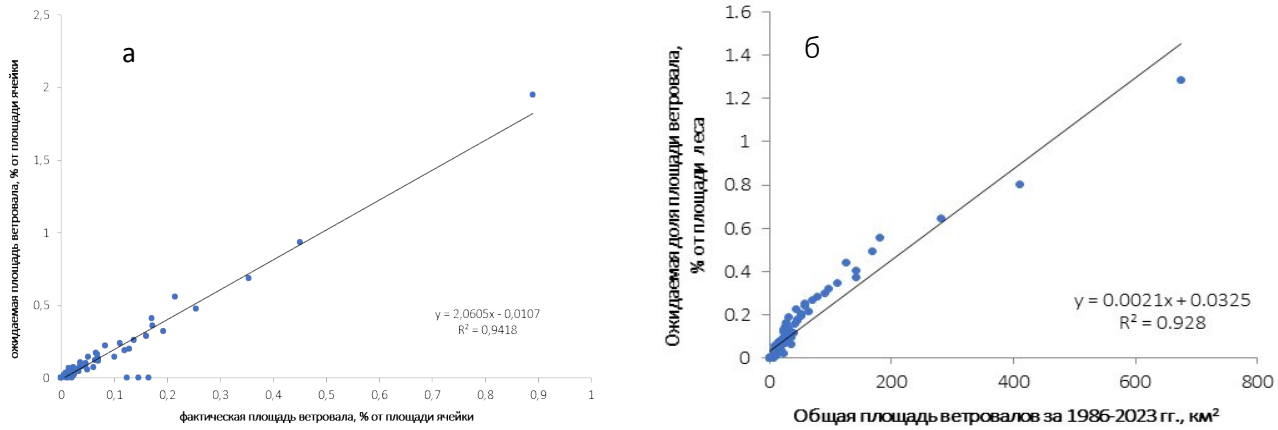

Рис. 7. Зависимость между фактической площадью ветровала и ожидаемой долей площади ветровалов от площади леса, рассчитанная после агрегирования исходных данных на 100 равных групп методом квантилей: градиентный бустинг (а) и случайный лес (б)

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 ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в рецензируемых научных журналах

1. Шихов А.Н., Абдуллин Р.К., Семакина А.В. Картографирование подверженности лесов гибели от пожаров и ветровалов (на примере территории Урала) // Геодезия и картография. – 2020. – № 4. – С. 19-30. DOI: 10.22389/0016-7126-2020-958-4-19-30
2. Шихов А.Н., Семакина А.В. Картографирование растительного покрова Пермского края по спутниковым снимкам Landsat // Географический вестник. 2022. №1. С. 150–164. DOI: 10.17072/2079-7877-2022-1-150-164
3. Shikhov A.N., Chernokulsky A.V., Azhigov I.O., Semakina A.V. A satellite-derived database for stand-replacing windthrow events in boreal forests of European Russia in 1986–2017 // Earth System Science Data. 2020. V. 12. P. 3489–3513. DOI: 10.5194/essd-12-3489-2020.
4. Семакина А.В., Шихов А.Н., Климина Е.А. Картографирование уязвимости лесов к ветровому воздействию на основе спутниковых данных (на примере Пермского края) // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2025. Т. 22. № 4. С. 236–252. DOI: 10.21046/2070-7401-2025-22-4-236-252.
5. Semakina A.V., Shikhov A.N., Klimina E.A. Mapping Windthrow Risk in the Forest Zone of the European Territory of Russia // Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics. 2026, Vol. 62, No. 8, pp. 127–140. DOI: 10.1134/S0001433826700854

Свидетельства о государственной регистрации баз данных

1. Шихов А.Н., Семакина А.В. Крупные пожары и ветровалы в лесах Республики Коми. Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2019620503 от 27.03.2019.
2. Шихов А.Н., Чернокульский А.В., Ажигов И.О. Семакина А.В. Ветровалы в лесной зоне Европейской территории России. Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2021622723 от 08.12.2021

Публикации в материалах конференций:

1. Семакина А.В. Подготовка данных для прогнозирования подверженности лесов ветровалам // Материалы Всероссийской конференции «Цифровая география». 25 – 27 сентября 2024 г. Пермь ПГНИУ.

2. Семакина А.В., Шихов А.Н., Климина Е.А. Оценка подверженности ветровалам лесов Пермского края // Материалы 22-й Международной конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». Москва: ИКИ РАН, 2024. С. 207. DOI 10.21046/22DZZconf-2024a
3. Семакина, А. В. Оценка уязвимости лесов Пермского края к ветровалам / А. В. Семакина, Е. А. Климина, А. Н. Шихов // Экологическая безопасность в условиях антропогенной трансформации природной среды: Сборник материалов всероссийской научной конференции молодых ученых с международным участием, посвященной памяти Г.А. Воронова, Н.Ф. Реймерса и Ф.Р. Штильмарка, Пермь, 23–26 апреля 2025 года. – Пермь: Пермский государственный национальный исследовательский университет, 2025. – С. 423-428. – EDN LPYUME.
4. Семакина А. В., Шихов А. Н., Климина Е. А. Оценка риска ветровалов в лесной зоне европейской части России на основе метода случайного леса // Региональные проблемы дистанционного зондирования Земли: материалы XII Междунар. науч. конф. Красноярск, 9–12 сентября 2025 г. / науч. ред. Е. А. Ваганов; отв. ред. Г. М. Цибульский. – Электрон. дан. (15,9 Мб). – Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2025