

АНАЛИЗ ВЕРОЯТНОСТИ ВОЗНИКНОВЕНИЯ ВЕТРОВАЛОВ НА ТЕРРИТОРИИ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ

Ребко Д.В.

Цель. Системный анализ и разработка комплексного подхода к оценке вероятности возникновения ветровалов для поддержки принятия управленческих решений в области предупреждения чрезвычайных ситуаций.

Методы. Исследование основано на методе системного анализа для структурирования многофакторной природы вероятности возникновения ветровалов. Для интегральной оценки применен аппарат нечеткой логики (модель Мамдани), позволяющий работать с лингвистическими переменными. Разработан программный модуль на Python, использующий методы компьютерного зрения и машинного обучения для распознавания породы деревьев и определения их биометрических параметров по фотографиям.

Результаты. Идентифицированы и классифицированы три группы факторов, влияющих на вероятность возникновения ветровалов: климатические (скорость и частота порывов ветра, осадки), географические (экспозиция местности, тип почвы, положение в массиве) и лесорастительные (устойчивость породы, высота и диаметр деревьев). Для каждой группы разработаны терм-множества. Предложена нечеткая логическая модель, интегрирующая эти факторы в единую оценку вероятности. Создан прототип программного обеспечения с графическим интерфейсом, который автоматически извлекает лесорастительные параметры из изображений и рассчитывает вероятность возникновения ветровалов.

Область применения исследований. Результаты имеют практическую значимость для Министерства по чрезвычайным ситуациям Республики Беларусь. Методика и программный модуль могут быть использованы для прогнозирования последствий штормов, планирования превентивных мероприятий и создания вероятностных карт возникновения ветровалов. Интеграция с системами мониторинга позволит создать эффективную систему раннего предупреждения и минимизации ущерба от ветровалов.

Ключевые слова: сильный ветер, повреждение леса, интегральная оценка вероятности, терм-множества, компьютерное зрение, машинное обучение, Python.

(Поступила в редакцию 3 октября 2025 г.)

Введение

Леса являются важнейшим природным ресурсом Беларуси, занимая около 40 % территории страны (порядка 8–9 млн га). Ветровалы, вызванные сильными ветрами, представляют серьезную угрозу для лесных экосистем и жизнедеятельности человека. Сильный ветер является одной из основных причин повреждения лесов в мире. Так, в Европе на долю ветра приходится более половины ущерба лесным массивам от всех факторов [1]. Беларусь не является исключением: периодически через территорию республики проходят мощные циклонные штормы, способные в кратчайшие сроки повредить огромные массивы леса. К примеру, ураган, который прошел 12–13 июля 2016 г., вызвал крупнейший в истории страны ветровал: было повалено около 4,6 млн м³ древесины на площади около 40,4 тыс. га. В 2022 г. последствия серии ураганов затронули суммарно около 90 тыс. га лесов Беларуси¹. В июле 2024 г. сильный ветер привел к гибели шестерых человек и повреждению лесов на площади свыше 41 тыс. га². Последний масштабный случай произошел в июле 2025 г., когда в результате ветроваля погиб один человек, четверо (включая ребенка) получили травмы и были госпитализированы. Сильным ветром были повреждены лесные массивы на площади

¹ Друк, М. В Могилевской области планируют высадить 640 га новых лесов на месте поврежденных ветровалами / М. Друк // Беларусь сегодня: SB.BY: [сайт]. – 2022. – 6 окт. – URL: <https://www.sb.by/articles/nalomalo-nemalo-drov.html> (дата обращения: 07.05.2025).

² Лукашенко поручил за будущий год восстановить лесонасаждения на пострадавших от стихии территориях // Полоцкий районный исполнительный комитет: [сайт]. – 2024. – 2 авг. – URL: <https://polotsk.vitebsk-region.gov.by/ru/novosti/respublikanskie-novosti/item/13654-lukashenko-poruchil-za-budushchij-god-vosstanovit-lesonasazhdeniya-na-postradavshikh-ot-stikhii-territoriyakh> (дата обращения: 07.05.2025).

около 1,7 тыс. га³. Подобные чрезвычайные ситуации наносят значительный экономический ущерб (утрата товарной древесины, затраты на ликвидацию последствий), экологический вред (разрушение местообитаний, повышенный риск вспышек вредителей в поваленных древесных остатках) и требуют больших усилий для восстановления лесов.

Для смягчения последствий воздействия сильных ветров на лесные массивы актуальна задача анализа факторов вероятности повреждения лесных массивов под воздействием сильного ветра. Выявление участков леса, наиболее уязвимых к воздействию сильного ветра, позволит заблаговременно принимать профилактические меры, например планировать выборочные санитарные рубки перезрелых и неустойчивых лесных насаждений до того, как они пострадают от воздействия ветра, оптимизировать схемы лесопосадок с учетом розы ветров, создавать ветрозащитные полосы и т.д. Современные информационные технологии дают новые возможности для мониторинга состояния лесов и автоматизированной оценки рисков. В данной работе выполнен системный анализ факторов, определяющих ветроустойчивость лесных насаждений, и разработан подход к интегральной оценке вероятности возникновения ветровала с применением аппарата нечеткой логики. Предлагаемый подход способен учитывать комплекс климатических, географических и лесорастительных факторов конкретной территории, что обеспечивает более точную оценку вероятности повреждения лесных массивов от воздействия сильного ветра по сравнению с учетом какого-либо одного фактора (например, только скорости ветра). Кроме того, разработан прототип программного средства на языке Python, использующего методы компьютерного зрения и машинного обучения для автоматизации сбора данных о лесорастительных факторах и расчета вероятности повреждения лесных массивов от воздействия сильного ветра.

Основная часть

1. Системный анализ факторов вероятности возникновения ветровалов. Возникновение ветровалов обусловлено сочетанием множества причин, которые условно можно разделить на три группы: климатические факторы, географические факторы и лесорастительные факторы. Такой подход согласуется с существующими моделями анализа рисков: в частности, отмечается, что на ветровую устойчивость влияют погодные, почвенно-рельефные условия и характеристики древостоев [1]. Ниже приведена классификация основных факторов вероятности по указанным группам.

1.1. Климатические факторы (множество С). Главным непосредственным вероятностным фактором является скорость ветра во время опасных метеорологических явлений, особенно максимальная скорость порывов. Ветер с порывами свыше 25–30 м/с способен вызывать массовые повреждения деревьев практически при любых условиях. Именно максимальная скорость порывов, а не средняя скорость ветра, во многом определяет масштабы последствий ветровала, поэтому при анализе вероятности его возникновения учитывается показатель «максимальная скорость порыва ветра (V_{\max})». Другим важным параметром является частота возникновения сильных ветров, а именно как часто в данном регионе или локальной местности происходят эпизоды с порывами сильного ветра. Например, одни районы могут регулярно подвергаться ураганным ветрам (несколько раз в год), тогда как в других сильные ветра случаются раз в несколько лет. Третьим климатическим фактором можно считать предшествующие сильному ветру осадки. Обильный дождь приводит к переувлажнению почвы и снижению устойчивости корневой системы к вывалу, вследствие чего даже сравнительно менее сильный ветер может повредить лесные массивы. Таким образом, продолжительные дожди перед сильными ветрами повышают вероятность возникновения ветровала. В рамках системного анализа каждому из перечисленных климатических факторов сопоставлены лингвистические градации (термы). Например, значения максимальной скорости порывов ветра разделяются на уровни: умеренная, сильная, экстремальная; частота возникновения сильных ветров может характеризоваться как низкая, средняя и высокая и т.п. Такая градация позволяет описывать погодные условия в понятных специалисту категориях. Климатические факторы вероятности возникновения ветровала представлены в таблице 1.

³ Иванова, К. Как выглядит сломанный и поваленный лес после страшного урагана в Беларусь: фото и видео / К. Иванова // Комсомольская правда: [сайт]. – 2025. – 11 июля. – URL: <https://www.belarus.kp.ru/daily/27724.5/5113231/> (дата обращения: 10.09.2025).

Таблица 1. – Климатические факторы вероятности возникновения ветровала

Фактор	Терм-множество		
C_1 – максимальная скорость порывов ветра	 умеренная	 сильная	 экстремальная
C_2 – частота возникновения сильных ветров	 низкая	 средняя	 высокая
C_3 – предшествующие осадки	 отсутствуют	 умеренные	 обильные

1.2. Географические факторы местности (множество G). Существенную роль играет рельеф и экспозиция местности относительно преобладающих ветров. На открытых возвышенных участках ветровая нагрузка выше, тогда как в низинах или за холмами лесные массивы могут быть частично защищены от воздействия сильного ветра. Например, исследования показывают [1], что сложный гористый или холмистый рельеф может увеличивать скорость порывов ветра за счет эффекта сложения потоков и ускорения их на вершинах холмов и, соответственно, вероятность возникновения ветровалов увеличивается. Хотя территория Беларуси преимущественно равнинная, локальные географические особенности местности (например, возвышенности Минской и Витебской областей) могут несколько влиять на ветровую нагрузку. Другой фактор – тип и влажность почв. Глубина распространения корней сильно зависит от почвенных условий: на хорошо дренированных, сухих почвах деревья формируют глубокую корневую систему, тогда как на глееватых и торфяных грунтах корни развиваются преимущественно в поверхностном слое из-за высокого уровня грунтовых вод. Соответственно, на переувлажненных почвах устойчивость деревьев к вывалу ниже. Так, по результатам исследований в Ирландии установлено [1], что ветровалы еловых насаждений чаще происходят на заболоченных (торфяных) почвах, чем на сухих бурых. К географическим факторам также можно отнести положение лесного массива относительно открытых пространств местности. Лесные насаждения, расположенные внутри большого массива (в глубине лесного массива), менее подвержены ветровому воздействию, поскольку окружены другими деревьями и защищены с краев. Напротив, опушки леса и отдельные изолированные участки леса испытывают прямое воздействие ветровой нагрузки и часто сильнее повреждаются при возникновении опасных метеорологических явлений. Более того, если сплошной лесной массив приобретает новую открытую границу (например, после вырубки соседнего участка леса или создания просеки), деревья, росшие внутри массива, внезапно оказываются на его краю и не адаптированы к ветровой нагрузке, что делает их особенно уязвимыми к воздействию ветровой нагрузки. В связи с этим для оценки вероятности возникновения ветровала учитывается фактор положения лесного насаждения: внутrimассивное (защищенное), краевое или изолированное. Географические факторы местности также оформлены в виде термов (табл. 2).

Таблица 2. – Географические факторы местности

Фактор	Терм-множество		
G_1 – экспозиция местности	 низкая	 средняя	 высокая
G_2 – водопроницаемость почвы	 хорошая	 удовлетворительная	 плохая
G_3 – положение лесного массива	 внутrimассивное	 краевое	 изолированное

1.3. Лесорастительные факторы (множество F). Важнейшие характеристики, определяющие устойчивость конкретного лесного массива к воздействию сильного ветра – это видовой состав, возраст и размеры деревьев. Глубина и характер корневой системы, прочность ствола, плотность древесины и даже наличие листвы в период опасного метеорологического явления – все это влияет на вероятность повреждения дерева. Как правило, хвойные породы менее устойчивы к воздействию ветровой нагрузки, чем лиственные, особенно в зимний период: хвойные деревья (например, ели) сохраняют хвою и имеют одинаковую площадь кроны круглый год, тогда как лиственные (береза, дуб и др.) в зимнее время без листвы и вероятность повреждения лиственных лесов зимой минимальна. Кроме того, у еловых деревьев неглубокая корневая система, что делает их менее устойчивыми к воздействию ветра, тогда как, например, сосна формирует более глубокий стержневой корень. В целом ель обыкновенная считается самой неустойчивой к сильному ветру породой в белорусских лесах (высокая вероятность ветровала), сосна и большинство лиственных пород более устойчивы (средняя или низкая вероятность повреждений).

Другим ключевым фактором является высота и возраст деревьев в лесном массиве. Чем выше располагается крона дерева, тем меньше устойчивость лесных массивов к воздействию сильного ветра, особенно если деревья при этом имеют сравнительно тонкие стволы. Показателем устойчивости служит отношение высоты дерева H к диаметру его ствола D (H/D – стройность дерева). Для хвойных лесных массивов критическим считается значение стройности дерева 80 (при превышении этого порога вероятность вывала дерева с корнем очень высокая) [1]. В густых одноярусных лесах при конкуренции за свет деревья вырастают высокими и стройными, что увеличивает значение отношения H/D и снижает устойчивость к воздействию ветра. В более разреженных или прошедших свое временное прореживание лесах деревья, как правило, имеют больший диаметр и более низкую крону, что значительно увеличивает устойчивость к ветровой нагрузке.

Стоит отметить, что режим хозяйственных мероприятий также влияет на устойчивость лесных массивов: запоздалое или чрезмерное проведение прореживаний может временно повысить вероятность возникновения ветровала, тогда как грамотное постепенное прореживание с молодого возраста способствует развитию прочной корневой системы и снижает уязвимость лесных насаждений к воздействию ветра. К лесорастительным факторам относятся: доминирующая порода, средняя высота деревьев, средний диаметр стволов и форма крон. Каждому из этих факторов также соответствуют лингвистические градации (термы). К примеру, средняя высота деревьев классифицируется как низкая (молодняки до 10 м), средняя (полувозрастной лес 10–20 м) или высокая (спелый лес более 20 м). Средний диаметр стволов может быть разделен на категории: тонкий, средний и большой.

Для формы крон также можно ввести градации (узкая, средняя, широкая), отражающие степень сомкнутости и разветленности кроны. Что касается классификации фактора устойчивости доминирующей породы (высокая, средняя, низкая) критерии могут быть уточнены на основе ранее проведенных исследований коэффициента β [2; 3; 4], отражающего аэродинамическое сопротивление кроны. Согласно работам [2; 5], для ели обыкновенной β достигает 70–75 кг/(м \times с), что указывает на ее низкую устойчивость к воздействию ветра. Для сосны обыкновенной характерны значения β порядка 50–65 кг/(м \times с), что позволяет отнести ее к категории средней устойчивости. Лиственные породы (береза, дуб, осина), имеющие более низкие значения β (<50 кг/(м \times с)), могут быть отнесены к категории высокой устойчивости [6]. Таким образом, коэффициент β обеспечивает количественное основание для термовой классификации фактора доминирующей породы, сохраняя при этом удобство лингвистических категорий (табл. 3).

Таблица 3. – Лесорастительные факторы

Фактор	Терм-множество		
	низкая	средняя	высокая
F_1 – устойчивость доминирующей породы деревьев	низкая	средняя	высокая
F_2 – средняя высота деревьев	низкая	средняя	высокая
F_3 – средний диаметр стволов деревьев	малый	средний	большой
F_4 – средняя ширина крон деревьев	малая	средняя	большая

При разработке терм-множеств учитывалось, что лицо, принимающее решения, не обязательно обладает познаниями в области информационных технологий или математиче-

ского моделирования, поэтому критерии должны быть представлены в удобной форме. Использование терм-множеств (лингвистических категорий) для описания факторов позволяет экспертам и практикам работать с системой на естественном языке, не погружаясь в числовые детали. Подобный подход ранее был успешно применен при оценке пожарной опасности лесов с помощью нечетких моделей [7].

2. Интегральная оценка вероятности. Определив ключевые факторы вероятности повреждения лесных массивов под воздействием сильного ветра и задав систему критериев, необходимо интегрировать их в единый показатель – интегральную оценку вероятности возникновения ветровала для данного участка леса. В настоящем исследовании в основу расчетов положена модель Мамдани [8], в которой входными переменными служат значения факторов $C_1, \dots, C_3, G_1, \dots, G_3, F_1, \dots, F_4$ в термовой форме, а выходной переменной – вероятность возникновения ветровала P . Структура системы факторов с термами представлена на рисунке 1.



Рисунок 1. – Структура системы факторов

Прямое использование всех факторов одновременно представляет многокритериальную задачу, решение которой можно реализовать методами нечеткой логики:

$$f_{\text{ветр}} = \langle C, G, F \rangle.$$

Для каждого входного фактора определены функции принадлежности к заданным лингвистическим термам. Для количественных факторов устанавливаются нечеткие границы. То есть границы таких термов могут перекрываться, например, некоторое фактическое значение скорости ветра одновременно может относиться к нескольким термам с разной степенью принадлежности. Качественные факторы (например, положение на краю массива) могут быть представлены бинарными или тернарными логическими переменными.

На основе знаний экспертов в области чрезвычайных ситуаций и анализа данных о произошедших на территории Республики Беларусь случаях ветровалов формируется база правил нечеткой логики по форме «Если ... То ...». Правила формируются для каждой группы факторов и для вероятности возникновения ветровала. Например:

Если $C_1 = \text{"экстремальная"}$
 Или ($C_1 = \text{"сильная"}$ И $C_2 = \text{"высокая"}$)
 Или ($C_1 = \text{"сильная"}$ И $C_3 = \text{"обильные"}$)
 То $C := \text{"высокий"}$.

Для вероятности возникновения ветровала P :

Если $C = \text{"высокий"}$ И ($G = \text{"высокий"}$ Или $F = \text{"высокий"}$)
 То $P := \text{"очень высокая"}$.

Для каждого правила определяется степень активации, а по группам правил проводится агрегация. После дефазификации получаем итоговый результат интегральной оценки вероятности возникновения ветровалов P в виде числового индекса или в виде лингвистической оценки («низкая», «повышенная», «высокая», «очень высокая») вероятность возникновения ветровалов).

На основании предложенной методики оценки вероятности может быть реализована шкала ветроопасности лесов. В отличие от тривиальных индикаторов (например, предупреждений по критическому значению максимальной скорости порывов ветра) интегральная оценка учитывает широкий контекст факторов. Так, для двух разных участков леса при одинаковом прогнозируемом значении максимальной скорости порывов ветра вероятность возникновения ветровалов может отличаться: он будет выше там, где неблагоприятные географические и лесорастительные факторы (например, заболоченный ельник на опушке), и ниже там, где условия более благоприятные (например, сосновый лес на сухой почве внутри большого лесного массива). Методика оценки вероятности может быть использована в деятельности Министерства по чрезвычайным ситуациям Республики Беларусь как элемент системы поддержки принятия управлеченческих решений. Она позволит дополнять сведения Белгидромета при подготовке штормовых предупреждений, акцентируя внимание на наиболее уязвимых участках лесного фонда и обеспечивая более адресное информирование органов местного управления и населения. Кроме того, данная методика оценки вероятности возникновения ветровала позволит своевременно определять приоритетные направления лесозащитных мероприятий: выделять кварталы для первоочередного обследования, зоны для усиленного мониторинга и территории, где требуется проведение профилактических рубок.

3. Программный модуль оценки вероятности возникновения ветровала. Для практического внедрения описанного подхода по оценке вероятности возникновения ветровала разработан прототип программного модуля, позволяющего автоматизировать сбор данных о группах факторов и рассчитывать вероятность повреждения лесных массивов от воздействия сильного ветра. Программный модуль реализован на языке Python и включает два основных компонента: подсистему компьютерного зрения с возможностью машинного обучения для анализа фотографий деревьев и лесных массивов и подсистему оценки интегральной вероятности на основе введенных факторов.

3.1. Подсистема компьютерного зрения. Данная часть использует методы машинного обучения (глубокие нейронные сети) для распознавания лесорастительных факторов деревьев по их изображениям. В разработке используется библиотека OpenCV и фреймворки глубокого обучения (TensorFlow/PyTorch). Алгоритм работы следующий: цифровое изображение дерева (или участка леса) поступает на вход программы, где сначала выполняется детекция отдельных деревьев и сегментация силуэтов ствола и кроны. Затем с помощью обученной сверточной нейронной сети производится классификация породы дерева: определяется вид/порода (например, сосна, ель, береза и т.д.) по характерным визуальным признакам коры, кроны, листьев/хвои. Модель оценивает геометрические параметры: высоту дерева, диаметр ствола и ширину кроны. Для измерения абсолютной высоты по одиночной фотографии используется предварительная калибровка: например, применяются стереофотограмметрические методы либо известные линейные ориентиры (рост человека на фото, лазерный дальномер и пр.). В нашем прототипе для упрощения предполагалось, что съемка ведется на стандартизированной высоте – 1,5 м, что позволило калибровать масштаб изображения. Выделив ствол на фото, алгоритм оценивает его диаметр на уровне груди на основе количества пикселей и известного расстояния до дерева. Ширина кроны определяется по границам сегментированной кроны. Точность определения физических параметров проверялась на контрольных деревьях, для которых были доступны лазерные измерения – средняя ошибка составила порядка 10–15 %.

3.2. Подсистема определения вероятности. Информация, извлеченная из изображения (порода, высота, диаметр ствола, ширина кроны), конвертируется в формат входных факторов модели определения вероятности. Так, порода сопоставляется с фактором F_1 (например, выявлено «ель» – низкая устойчивость доминирующей породы), измеренная высота – с фактором F_2 (например, 25 м – высокая средняя высота деревьев) и т.д. Дополнительно модуль может принимать внешние данные: координаты участка (для определения географических факторов местности G) и текущие/прогнозные метеоданные (для климатических факторов вероятности возникновения ветровала C). Координаты позволяют автоматически получить сведения о рельефе (высота над уровнем моря, открытость местности)

и типе почв из геоинформационных слоев. Метеоданные (например, прогноз максимальной скорости порывов ветра на ближайшие дни) загружаются через API⁴ погодных служб либо из архивов наблюдений. Все эти параметры поступают на вход подсистемы интегральной оценки вероятности, реализованной согласно описанной нечеткой модели. Модуль выполняет нечеткий логический вывод или расчет вероятности P и выдает результат пользователю.

3.3. Интерфейс и использование программного модуля. Программа представляет собой приложение с графическим интерфейсом. Пользователь может загрузить фотографию дерева или лесного участка, указать местоположение и дату (для привязки метеоусловий), после чего система отображает распознанные характеристики деревьев (например: «порода: сосна обыкновенная; высота ~15 м; диаметр ствола ~0,64 м; ширина кроны ~3,2 м» (рис. 2).

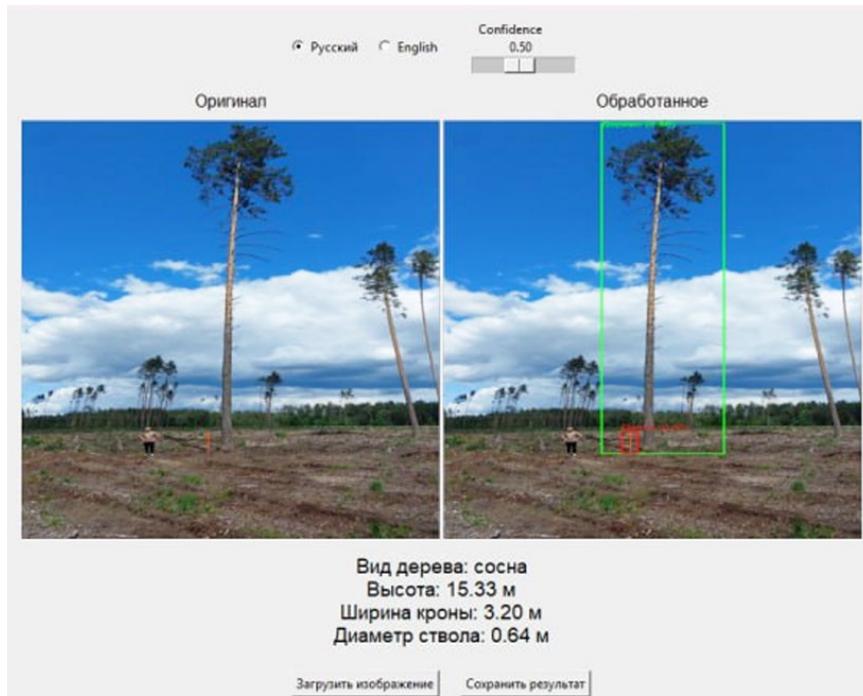


Рисунок 2. – Интерфейс программного модуля

Вероятность возникновения ветровала выводится в форме цветовой индикации и текстового описания, например: «Вероятность возникновения высокая (вероятность ветровала при сильном ветре ~70 %)». Подобный инструмент может найти широкое применение в деятельности Министерства по чрезвычайным ситуациям Республики Беларусь. При оперативном реагировании на штормовые предупреждения специалисты МЧС смогут использовать автоматизированную оценку вероятности возникновения ветровала для прогнозирования возможных зон повреждений лесов и организации превентивных мер. Модуль может быть интегрирован с беспилотными летательными аппаратами, которые способны собирать большое количество снимков лесных массивов, после чего программа автоматически вычисляет показатели устойчивости лесонасаждений к воздействию ветра. Это позволит формировать оперативные карты вероятности возникновения ветровала и заблаговременно планировать защитные мероприятия. Таким образом, реализуется система мониторинга вероятности возникновения ветровалов в масштабах региона, что повышает эффективность управления и минимизирует последствия метеорологических опасных явлений.

В настоящее время разработанный программный модуль проходит тестирование на ограниченной выборке данных. Разрабатываются методы улучшения точности распознавания (например, учет сезонных изменений внешнего вида деревьев, добавление снимков в инфракрасном диапазоне для оценки состояния здоровья деревьев). Планируется также внедрение функции автообновления факторов вероятности при поступлении новых данных, например ежесуточное обновление погодных условий из открытых источников и пополнение базы данных ранее зарегистрированных ветровалов.

⁴ API – Application Programming Interface (программный интерфейс приложения).

Заключение

Сильные ветры представляют значительную опасность для лесов Беларуси, о чем свидетельствуют случаи массовых ветровалов в последние годы. Проведенный системный анализ вероятности повреждения деревьев от воздействия ветра позволил выявить совокупность ключевых факторов, определяющих уязвимость лесных насаждений: от климатических параметров до свойств конкретных лесных насаждений и условий их произрастания.

Разработана методика интегральной оценки вероятности повреждения лесных массивов от воздействия сильного ветра (ветровалов), отличающаяся применением нечеткой логической модели, учитывающей разнообразные факторы (географические, климатические, лесорастительные), для которых предложена многоуровневая градация в виде терм- множеств, и использующей понятные лингвистические категории (низкий, средний, высокий и т.д.). Предложенная методика позволяет проводить прогнозирование последствий опасных метеорологических явлений, сопровождающихся возникновением сильного ветра, для лесонасаждений.

Практическая значимость работы заключается в возможности применения интегральной оценки вероятности возникновения ветровалов Министерством по чрезвычайным ситуациям Республики Беларусь. Для МЧС точная оценка вероятности возникновения ветровала имеет большое значение при планировании мер гражданской защиты: заблаговременном прогнозировании последствий опасных метеорологических явлений, оперативной локализации завалов, организации безопасных маршрутов эвакуации, а также предупреждении техногенных аварий вследствие повреждения инфраструктуры в лесных массивах. Таким образом, разработанные методы оценки вероятности возникновения ветровалов могут служить элементом интегрированной системы предупреждения и минимизации чрезвычайных ситуаций природного характера.

Предложенная методика может дополнять существующие системы мониторинга: как показано, она имеет потенциал интеграции с автоматизированными средствами сбора данных (дроны, камеры) и с метеорологическими предупреждениями.

Разработка программного модуля на Python с использованием компьютерного зрения и методов машинного обучения демонстрирует, как цифровые инструменты могут помочь в автоматизации оценки вероятности повреждения лесов сильным ветром. Хотя представленный модуль находится на стадии прототипа, его дальнейшее развитие позволит создать полнофункциональную систему поддержки принятия решений в области управления и реагирования на чрезвычайные ситуации природного характера, связанные с воздействием сильного ветра на лесные массивы.

В перспективе планируется расширение базы знаний модели за счет накопления данных о фактически произошедших ветровалах и условиях их возникновения. Это позволит откорректировать функции принадлежности факторов и уточнить правила нечеткого вывода, повышая точность прогноза. Также важно учитывать возможное усиление экстремальных погодных явлений в связи с изменением климата – интегральная оценка может быть адаптирована под различные климатические сценарии. Таким образом, сочетание системного анализа, современных данных наблюдений и инструментов машинного обучения открывает путь к более устойчивому и адаптивному управлению принятием решений в условиях опасных метеорологических явлений, связанных с воздействием сильного ветра на лесные массивы Республики Беларусь.

ЛИТЕРАТУРА

1. Dhubháin, Áine. Understanding and managing windthrow / Áine Dhubháin, Niall Farrelly // COFORD Connects. Silviculture and Forest Management. – 2018. – No. 23. – 4 p. – URL: <https://coford.ie/media/coford/content/publications/2018/SM23ManagingWindthrow160418.pdf> (date of access: 07.05.2025).
2. Borisevich, S.A. Drag relationships for full-grown Scots pine trees / S.A. Borisevich, A.N. Kamluk, D.V. Rebko // Canadian Journal of Forest Research. – 2022. – Vol. 52, No. 5. – P. 882–887. – DOI: 10.1139/cjfr-2021-0043.
3. Borisevich, S.A. Evaluation of the drag coefficients of tree crowns by numerical modeling of their free fall / S.A. Borisevich, V.S. Vikhrenko // Agricultural and Forest Meteorology. – 2018. – Vol. 256-257. – P. 346–352. – DOI 10.1016/j.agrformet.2018.03.020. – EDN: YBНОРJ.
4. Борисевич, С.А. Определение сопротивления движению кроны дерева / С.А. Борисевич, А.Н. Камлюк, Д.В. Ребко // Труды БГТУ. № 6. Физико-математические науки и информатика. – 2013. – № 6 (162). – С. 34–36. – EDN: TKARSZ.

5. Орлов, С.А. Исследование коэффициента сопротивления элементов кроны кедровой сосны / С.А. Орлов, Л.А. Шрагер // Вестник Томского государственного университета. Математика и механика. – 2011. – № 2 (14). – С. 103–110. – EDN: NUXVEN.
6. Gardiner, B. Review: Wind impacts on plant growth, mechanics and damage / B. Gardiner, P. Berry, B. Moulia // Plant Science. – 2016. – Vol. 245. – P. 94–118. – DOI: 10.1016/j.plantsci.2016.01.006.
7. Иванов, С.А. Системный анализ факторов, влияющих на возникновение лесных пожаров в Северо-Западном федеральном округе / С.А. Иванов // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Управление, вычислительная техника и информатика. – 2022. – № 4. – С. 26–34. – DOI: 10.24143/2073-5529-2022-4-26-34. – EDN: CMTCPH.
8. Баданина, Н.Д. Интегрирование модуля нечеткого логического вывода с помощью веб-технологий / Н.Д. Баданина, А.А. Зинченко, В.А. Судаков // Научный сервис в сети Интернет: труды XXV Всероссийской научной конференции, Москва, 18–21 сент. 2023 г., онлайн. – М.: ИПМ им. М.В. Келдыша, 2023. – С. 62–73. – DOI: 10.20948/abrau-2023-5. – EDN: FLWBON.

Анализ вероятности возникновения ветровалов на территории Республики Беларусь
**Analysis of the probability of windfall occurrence on the territory
of the Republic of Belarus**

Ребко Дмитрий Вячеславович

Государственное учреждение образования
«Университет гражданской защиты
Министерства по чрезвычайным ситуациям
Республики Беларусь», кафедра
ликвидации чрезвычайных ситуаций,
старший преподаватель

Адрес: ул. Машиностроителей, 25,
220118, г. Минск, Беларусь

Email: rebko.dmitriy@yandex.ru

Dmitriy V. Rebko

State Educational Establishment «University
of Civil Protection of the Ministry
for Emergency Situations of the Republic
of Belarus», Chair of Emergency Elimination,
Senior Lecturer

Address: Mashinostroiteley str., 25,
220118, Minsk, Belarus

Email: rebko.dmitriy@yandex.ru

ORCID: 0009-0009-6347-5170

ANALYSIS OF THE PROBABILITY OF WINDFALL OCCURRENCE ON THE TERRITORY OF THE REPUBLIC OF BELARUS

Rebko D.V.

Purpose. Systems analysis and development of an integrated approach to assessing the likelihood of windfalls to support management decision-making in the field of emergency prevention.

Methods. The study is based on the method of systems analysis to structure the multifactorial nature of the probability of windfall occurrence. Fuzzy logic (the Mamdani model) was used for the integrated assessment, allowing for processing of linguistic variables. A Python software module was developed that utilizes computer vision and machine learning methods to recognize tree species and determine their biometric parameters from photographs.

Findings. Three groups of factors influencing the probability of windfalls have been identified and classified: climatic (speed and frequency of wind gusts, precipitation), geographical (terrain exposure, soil type, position in the massif) and forest vegetation (stability of the species, height and diameter of trees). Term sets were developed for each group. A fuzzy logic model was proposed that integrates these factors into a single probability estimate. A software prototype with a graphical interface has been created that automatically extracts forest vegetation parameters from images and calculates the probability of windfalls.

Application field of research. The results have practical significance for the Ministry of Emergency Situations of the Republic of Belarus. The methodology and software module can be used to forecast storm impacts, plan preventive measures, and create probability maps of windfalls occurrence. Integration with monitoring systems will enable the creation of an effective early warning system and minimization of damage from windfalls.

Keywords: strong wind, forest damage, integral probability estimation, term sets, computer vision, machine learning, Python.

(The date of submitting: October 3, 2025)

REFERENCES

1. Dhubháin Áine, Farrelly Niall. Understanding and managing windthrow. *COFOR Connects. Silviculture and Forest Management*, 2018. No. 23. 4 p. URL: <https://coford.ie/media/coford/content/publications/2018/SM23ManagingWindthrow160418.pdf> (date of access: 07.05.2025).
2. Borisevich S.A., Kamluk A.N., Rebko D.V. Drag relationships for full-grown Scots pine trees. *Canadian Journal of Forest Research*, 2022. Vol. 52, No. 5. Pp. 882–887. DOI: 10.1139/cjfr-2021-0043.
3. Borisevich S.A., Vikhrenko V.S. Evaluation of the drag coefficients of tree crowns by numerical modeling of their free fall. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2018. Vol. 256-257. Pp. 346–352. DOI: 10.1016/j.agrformet.2018.03.020. EDN: YBHOPJ.
4. Borisevich S.A., Kamluk A.N., Rebko D.V. Opredelenie soprotivleniya dvizheniyu krony dereva [Determination of the resistance of the moving tree crown]. *Proceedings of BSTU. Series 6. Physical and Mathematical Sciences and Informatics*, 2013. No. 6 (162). Pp. 34–36. (rus). EDN: TKARSZ.
5. Orlov S.A., Shrager L.A. Issledovanie koeffitsienta soprotivleniya elementov krony kedrovoy sosny [Research of the resistance coefficient of cedar pine crown elements]. *Tomsk State University Journal of Mathematics and Mechanics*, 2011. No. 2 (14). Pp. 103–110. (rus). EDN: NUXVEN.
6. Gardiner B., Berry P., Moulia B. Review: Wind impacts on plant growth, mechanics and damage. *Plant Science*, 2016. Vol. 245. Pp. 94–118. DOI: 10.1016/j.plantsci.2016.01.006.
7. Ivanov S.A. Sistemnyy analiz faktorov, vliyayushchikh na vozniknovenie lesnykh pozharov v Severo-Zapadnom federal'nom okruche [Systems analysis of factors causing forest fires in Northwestern Federal District]. *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Management, Computer Science and Informatics*, 2022. No. 4. Pp. 26–34. (rus). DOI: 10.24143/2073-5529-2022-4-26-34. EDN: CMTCPH.
8. Badanina N.D., Zinchenko A.A., Sudakov V.A. Integrirovanie modulya nechetkogo logicheskogo vyyoda s pomoshch'yu veb-tehnologiy [Integration of fuzzy inference module using web technologies]. *Proc. of XXV All-Russian scientific conf. «Scientific Services & Internet», Moscow, September 18–21, 2023, online*. Moscow: Institute of Applied Mathematics named after M.V. Keldysh, 2023. Pp. 62–73. (rus). DOI: 10.20948/abram-2023-5. EDN: FLWBON.

Copyright © 2025 Rebko D.V.

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License.