ЭКОЛОГИЯ, 2024, № 4, с. 284–292

УДК 631.48:574.4

КОЛИЧЕСТВЕННЫЙ АНАЛИЗ ФАКТОРОВ, ВЛИЯЮЩИХ НА ПОВРЕЖДЕНИЕ СТАРОВОЗРАСТНОГО ЮЖНОТАЕЖНОГО ДРЕВОСТОЯ В РЕЗУЛЬТАТЕ КАТАСТРОФИЧЕСКОГО ВЕТРОВАЛА, НА ОСНОВЕ ДИСТАНЦИОННЫХ И ОБЪЕДИНЕННЫХ ДАННЫХ

© 2024 г. Н. В. Иванова[a, *], М. П. Шашков[b], А. В. Лебедев[c, d], В. Н. Шанин[e]

[a] Институт математических проблем биологии РАН – филиал ИПМ им. М.В. Келдыша РАН, Россия 142290 Пущино, ул. проф. Виткевича, 1

[b] Карагандинский университет им. акад. Е.А. Букетова, Казахстан 100028 Караганда, ул. Университетская, 28, к. 3

[c] Российский государственный аграрный университет – МСХА им. К.А. Тимирязева, Россия 127434 Москва, ул. Тимирязевская, 49

[d] Государственный заповедник "Кологривский лес", Россия 157440 Кологрив, ул. Некрасова, 48

[e] Институт физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН – обособленное подразделение ФИЦ "Пущинский научный центр биологических исследований РАН", Россия 142290 Пущино, ул. Институтская, 2, к. 2

**e-mail: Natalya.dryomys@gmail.com*

Поступила в редакцию 16.01.2023 г.
После доработки 07.04.2024 г.
Принята к публикации 12.04.2024 г.

Исследованы последствия массового (катастрофического) ветровала в малонарушенном массиве южнотаежных ельников заповедника "Кологривский лес". Степень повреждения древостоев была оценена путем дешифрирования космических снимков Sentinel-2. Для количественного анализа факторов, влияющих на наличие ветровальных повреждений, использовали данные портала GBIF, глобальные модели высот местности SRTM и высот древостоев. Выявлено, что ветровалами повреждены древостои на площади 277.9 га (40.5% всего массива). Результаты анализа моделей высот и регрессионных моделей показали, что более подвержены ветровалу еловые древостои, а также древостои большей высоты или произрастающие на бóльших высотах на местности.

Ключевые слова: заповедник "Кологривский лес", GBIF, SRTM, CHM, Sentinel-2, NDWA-8a
DOI: 10.31857/S0367059724040043 **EDN:** BIVKVE

Массовые ветровалы оказывают значительное влияние на структуру и сукцессионную динамику лесных экосистем [1, 2]. Из-за глобальных изменений климата частота таких катастрофических явлений возрастает [3], что обусловливает актуальность исследований в этой области. Наземные обследования поврежденных ветровалом участков часто затруднительны или невозможны, поэтому для выявления и оценки площади ветровальных повреждений в основном применяются дистанционные методы. В последние годы благодаря доступности космических снимков высокого разрешения, данных радарной и лазерной съемок, а также развитию методов их обработки в этом направлении достигнуты значительные успехи [4–7].

Не менее важной задачей является количественный анализ факторов, влияющих на характер и степень ветровальных нарушений. Однако на практике данные о состоянии древостоев до ветровала весьма ограничены или отсутствуют, что делает невозможным применение методов количественного анализа. Мы считаем, что для решения этой проблемы перспективно использование тематических массивов открытых данных, созданных на основе дистанционных и (или) наземных измерений. Такие данные широко применяются для выявления значимых предикторов в задачах моделирования потенциальных ареалов видов [8], а также представляют большой интерес для оценки состояния древостоев до катастрофических нарушений. Для анализа доступны тематические

массивы данных почвенных характеристик [9, 10], лесной фитомассы [11], различные модели высот [12–14] и другие. Многие из них имеют высокое пространственное разрешение (10–50 м/пиксель), что позволяет применять их даже для небольших территорий. Интерес для анализа представляют также данные глобального портала GBIF, содержащего не только сведения о точках встреч отдельных видов, но и информацию об их местообитаниях и других характеристиках [15].

Цель данной работы – оценка площади ветровала и количественный анализ факторов, влияющих на повреждения древостоев в малонарушенных южнотаежных лесах заповедника "Кологривский лес", на основе комплексного набора данных дистанционного зондирования, глобальных моделей высот, репозитория GBIF и наземных измерений.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Район исследования. Работа выполнена в "ядре" заповедника "Кологривский лес" (Костромская обл.), находящемся в 20 км к западу от г. Кологрив в бассейне р. Вонюх (правый приток р. Унжа). Территория принадлежит ландшафту моренной холмистой лессово-суглинистой равнины. "Ядро" заповедника является наиболее длительно покрытой лесом территорией в регионе: согласно литературным данным, еловые древостои не подвергались антропогенным воздействиям последние 300–400 лет.

До ветровала лесной покров был представлен малонарушенными разновозрастными сложными ельниками липняковыми с фрагментами одновозрастных березняков, образовавшихся на месте гарей и узколесосечных рубок первой половины XX в. В составе малонарушенных древостоев, помимо ели европейской (*Picea abies* (L.) Karst.) и липы мелколистной (*Tilia cordata* Mill.), участвовали береза пушистая (*Betula pubescens* Ehrh.), пихта сибирская (*Abies sibirica* Ledeb), вяз шершавый (*Ulmus glabra* Huds.), клен остролистный (*Acer platanoides* L.), единично – рябина обыкновенная (*Sorbus aucuparia* L.) и ива козья (*Salix caprea* L.). Древостои разновозрастные и многоярусные, в популяциях позднесукцессионных видов деревьев часто присутствовали несколько поколений. В пологе леса имелись многочисленные "окна", образованные в разное время при падении единичных деревьев [16–19]. По нашим оценкам, общая площадь малонарушенных древостоев до ветровала составляла ~700 га. Массовый ветровал произошел 15 мая 2021 г., вызвав значительные повреждения этого уникального лесного массива.

Методы дешифрирования ветровальных нарушений по дистанционным данным. Для анализа ветровальных повреждений были использованы данные дистанционного зондирования Sentinel-2, полученные через сервис Copernicus Open Access Hub. Использовали съемку, выполненную до (19 июня 2020 г.) и после (19 июня 2021 г.) катастрофического ветровала. Для детектирования ветровальных повреждений рассчитывали разностный нормализованный водный индекс *NDWA*8*A* [20] по формуле:

$$NDWA8A = \frac{B8A - B11}{B8A + B11},$$

где $B8A$ – ближний инфракрасный диапазон (Narrow NIR), $B11$ – коротковолновое инфракрасное излучение (SWIR). Использовали растровые слои пространственным разрешением 20 м/пиксель. В качестве поврежденных рассматривали участки площадью >0.04 га.

Оценка факторов, влияющих на наличие ветровальных повреждений. Анализировали влияние следующих факторов на степень ветровальных нарушений: тип леса, высоты древостоя и местности.

Несмотря на многочисленные исследования [16–18, 21, 22] и наличие материалов лесоустройства, подробные карты лесной растительности "ядра" заповедника отсутствуют. Информация о состоянии древостоев до ветровала ограничена данными мониторинга на сети постоянных пробных площадей, а также разрознена в научных публикациях. Нами были обобщены материалы собственных предыдущих исследований [17, 23, 24] и данные, доступные через репозиторий GBIF [25]. В объединенном массиве получены 192 точки с географическими координатами, для которых доступна информация о составе древостоя (рис. 1, табл. 1). Анализируемые данные относятся к периоду с 2010 г. по 2021 г. и собраны до катастрофического ветровала либо на участках, не поврежденных ветровалом.

Для каждой точки путем сопоставления с контурами ветровала, выделенными по Sentinel-2, определяли наличие/отсутствие ветровальных повреждений. Высоты местности для каждой точки определяли по модели Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) [26], имеющей пространственное разрешение 30 м/пиксель (рис. 2а, б), высоты древостоя – по глобальной модели Canopy Height Model (CHM) [13] с пространственным разрешением 0.3 угловой секунды/пиксель (рис. 2в–е). Данные

Таблица 1. Ветровальные повреждения (число точек) в разных типах сообществ согласно полученному массиву объединенных данных

Типы сообществ	Поврежденные ветровалом	Неповрежденные ветровалом
Ельники	44	28
Липняки	3	23
Березняки	5	17
Осинники	2	1
“Окна” в пологе леса	29	25
Сфагновое болото	3	12

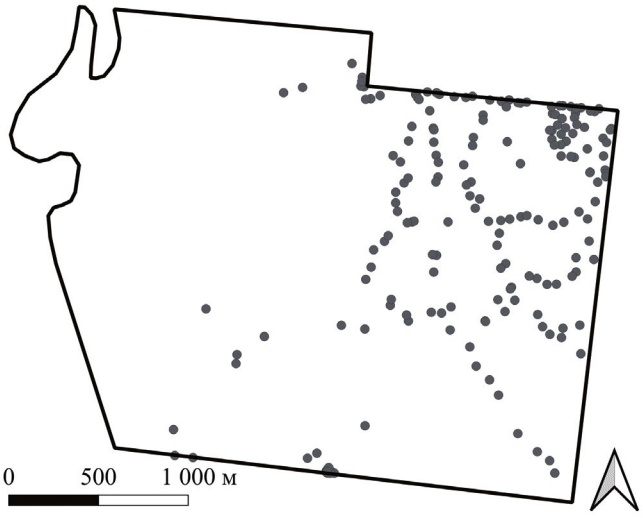

Рис. 1. Локализация точек из массива объединенных данных на территории “ядра” заповедника.

SRTM представляют собой цифровую модель высот, полученную на основе радарной топографической съемки, произведенной в феврале 2000 г. с высоты ~225 км [12]. Глобальный слой высот древостоя CHM составлен на основе данных Sentinel-2 и проекта Global Forest Canopy Height 2019 [27], обработанных при помощи методов глубокого обучения [13].

Дальнейший анализ данных проводили в среде статистического программирования R v. 4.2.1 [28]. Значимость анализируемых факторов оценивали при помощи множественной логистической регрессии по массиву объединенных данных; использовали функцию glm. При построении регрессионной модели в качестве предикторов рассматривали доминант древостоя, высоту по моделям SRTM и CHM, а также прямоугольные координаты точек. В анализ не были включены точки, относящиеся к сфагновым болотам и осинникам; последние – из-за небольшого объема выборки (всего 3 точки). Качество модели оценивали при помощи критерия хи-квадрат по методу, реализованному в функции Anova. Затем для оценки пространственной вариации строили полувариограмму остатков от регрессии. Для этого использовали функцию variog из пакета geoR v. 1.9-2 [29]. Перед построением моделей оценивали корреляции между предикторами при помощи функции cor.

Поскольку собранные данные охватывали не всю территорию “ядра” заповедника, дополнительно сравнивали средние высоты SRTM и CHM на поврежденных и неповрежденных ветровалом участках. Для этого в среде QGIS v. 3.14 [30] из каждой модели высот получены 2 растра, соответствующие поврежденным и неповрежденным территориям. После чего в среде R были рассчитаны средние значения высот и оценена статистическая значимость различий для каждой модели при помощи критерия Стьюдента (функция t.test).

РЕЗУЛЬТАТЫ

В результате детектирования данных Sentinel-2 выяснено, что ветровалом повреждено 277.9 га, что составляет 40.5% всей площади “ядра” заповедника. Ветровальные повреждения имеют гетерогенную структуру (рис. 3): 66.0% поврежденной площади представлено одним полигоном площадью 183.5 га, протяженностью ~2.5 км и максимальной шириной ~1.5 км. Остальные повреждения имеют меньшую площадь. При этом полигоны площадью до 1 га составляют 86.0% от общего числа детектированных полигонов, до 5 га – 96.5%.

Предварительные результаты построения регрессионной модели показали, что из рассматриваемых предикторов все, кроме X-координаты (долгота), оказывают значимое влияние на наличие ветровальных повреждений. Тем не менее мы считаем, что значимое влияние Y-координаты (широта) является артефактом, так как рассматриваемые точки расположены в пространстве неравномерно: большинство из них находится в северной части “ядра” заповедника. Это связано с тем, что исследования проводились в основном в северо-восточной (наиболее доступной) его части.

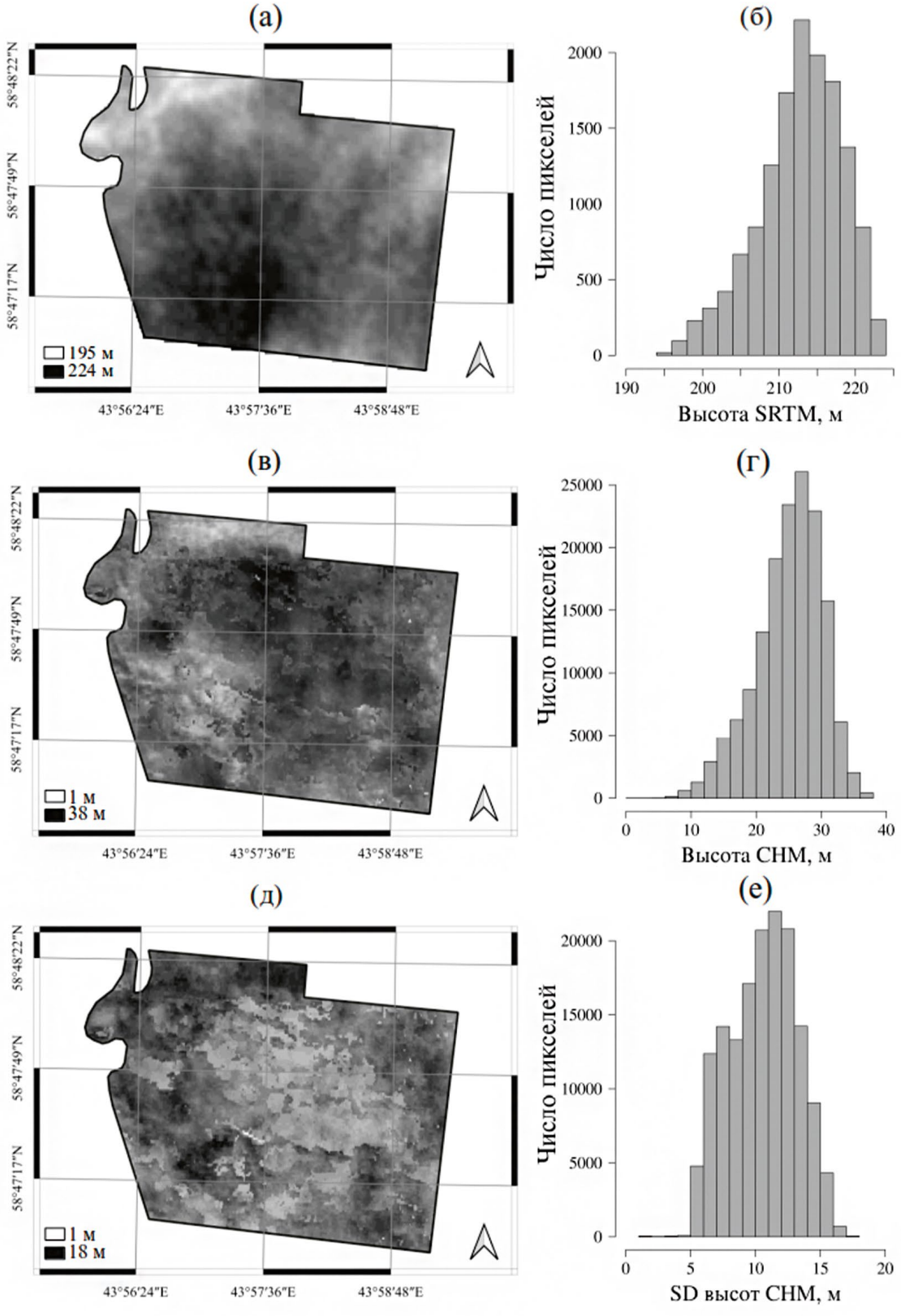

Рис. 2. Модели высот местности (SRTM, м над ур. м.) и высот крон (CHM, м) для исследуемого участка: а, в, д – растровые изображения, б, г, е – гистограммы распределения высот и стандартных отклонений; а, б – модель SRTM [26], в, г – модель CHM [13], д, е – стандартные отклонения высот в модели CHM [13].

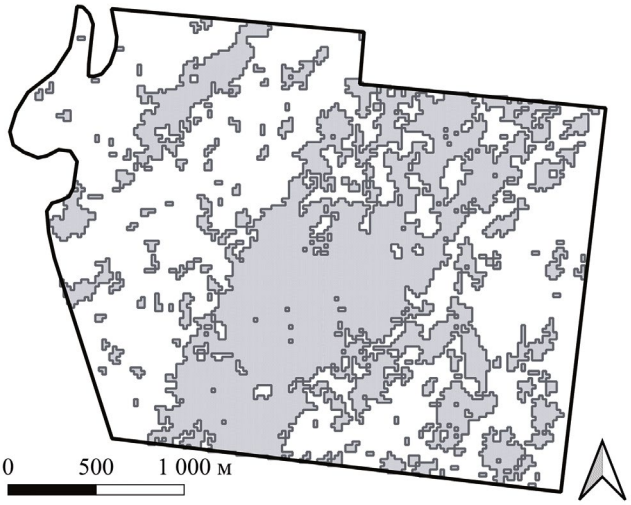

Рис. 3. Повреждения в результате катастрофического ветровала в “ядре” заповедника (показаны серой заливкой).

Поэтому в итоговой регрессионной модели Y-координату не рассматривали в качестве предиктора.

Значимая корреляция между предикторами отсутствовала. Согласно полученным результатам (табл. 2), на наличие ветровальных повреждений значимо положительно влияли высоты по SRTM и CHM, а также преобладание ели в древостое. Доминирование липы имело значимое отрицательное влияние на наличие ветровальных повреждений. Для березовых древостоев значимых результатов не выявлено, но отрицательный коэффициент логистической регрессии свидетельствует об устойчивости этих древостоев к ветровалам. “Окна” в пологе леса рассматривали в качестве базового фактора, поэтому они не приведены в табл. 2.

Анализ качества модели при помощи критерия хи-квадрат показал значимость всех предикторов по сравнению с моделью, в которой присутствует только свободный член (для SRTM – $p < 0.001$, для CHM – $p < 0.05$, для доминанта древостоя – $p < 0.001$). Результаты анализа остатков при помощи полувариограммы не выявили в них пространственной зависимости (рис. 4).

Результаты анализа высот SRTM и CHM на всей площади “ядра” заповедника показали наличие значимых различий между поврежденными и неповрежденными ветровалом участками: средняя высота по модели SRTM на ветровальных участках составила 215.2 ± 4.9 м, на неповрежденных – 211.9 ± 5.4 м; средняя высота полога леса по модели CHM на участках, поврежденных ветровалом, была 26.4 ± 4.8 м, на неповрежденных – 24.9 ± 5.2 м (рис. 5). В обоих случаях различия были статистически значимы ($p < 0.001$).

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Результаты дешифрирования данных Sentinel-2 показали, что воздействию массового ветровала подверглась почти половина площади “ядра” заповедника. Тем не менее распад еловых древостоев наблюдался еще до ветровала [18, 22], что свидетельствует о наличии дополнительных естественных причин данного процесса. Обобщенные в ходе этого исследования данные, а также предварительные результаты анализа данных Sentinel-2 за последние 5 лет (здесь не представлены) также показывают, что до ветровала лесной покров “ядра” заповедника на многих участках представлял собой мозаику окон возобновления разного возраста. Из-за массового ветровала в центральной части “ядра” эта мозаика, видимо, стала более гомогенной вследствие наиболее масштабных повреждений (см. рис. 3). В то же время большинство выделенных нами ветровальных полигонов имели площадь до 1 га. Такие относительно небольшие повреждения, напротив, могут способствовать увеличению мозаичности.

Таблица 2. Результаты регрессионного анализа

Предикторы	Коэффициенты регрессии	Стандартная ошибка	z-статистика	*p*-значение
Свободный член	–27.02	8.33	–3.24	0.0012
Высота по модели SRTM	0.11	0.039	2.87	0.0041
Высота по модели CHM	0.11	0.046	2.59	0.0097
Древостои				
Ельники	0.78	0.39	1.99	0.046
Березняки	–0.53	0.62	–0.85	0.40
Липняки	–1.95	0.69	–2.82	0.0048

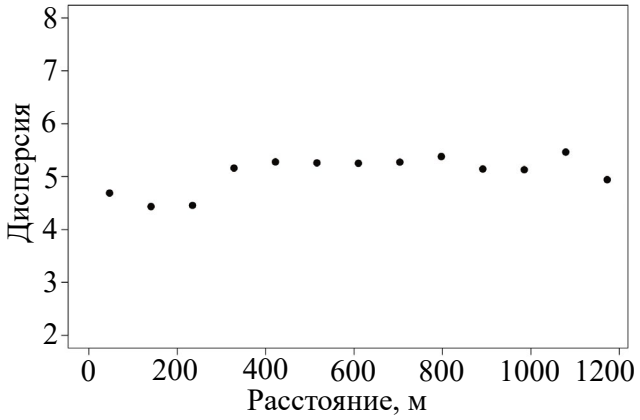

Рис. 4. Полувариограмма остатков от логистической регрессии.

Результаты регрессионного анализа показали, что еловые древостои наиболее подвержены ветровалу. Древостои с доминированием липы более устойчивы к ветровальным повреждениям. Это согласуется с имеющимися литературными данными о низкой ветроустойчивости ели [31] и высокой ветроустойчивости широколиственных видов деревьев [32, 33]. Также известно [34, 35], что деревья ели характеризуются большей относительной протяженностью кроны в вертикальном направлении по сравнению с лиственными деревьями. Высокая протяженность крон способствует повышению их парусности и снижению ветроустойчивости. В наших предыдущих исследованиях в “ядре” заповедника [19] также показано, что древостои с участием липы менее, чем еловые, подвержены влиянию катастрофического ветровала из-за особенностей их структуры и видового состава подроста.

Для березовых древостоев не выявлено значимых различий. Тем не менее в ходе наземных исследований было замечено, что березняки меньше пострадали от ветровала. Вероятно, это связано с тем, что на момент шквала (15 мая) листья на деревьях еще не распустились (собственные наблюдения), вследствие чего их кроны имели меньшую парусность и поэтому березы меньше пострадали по сравнению с хвойными.

Результаты регресионного анализа также показали, что ветровальными являются древостои с наибольшими высотами деревьев либо древостои, произрастающие на бóльших относительных высотах. Из литературы [34] известно, что в верхней части полога лесных насаждений наблюдается максимальная скорость ветра, а при приближении к земной поверхности она резко снижается. Этот факт хорошо согласуется с нашими результатами, показавшими меньшую ветроустойчивость древостоев на повышениях рельефа.

В целом по результатам количественного анализа, можно сделать вывод о том, что больше всего пострадали от ветровала наиболее старовозрастные еловые элементы древостоев.

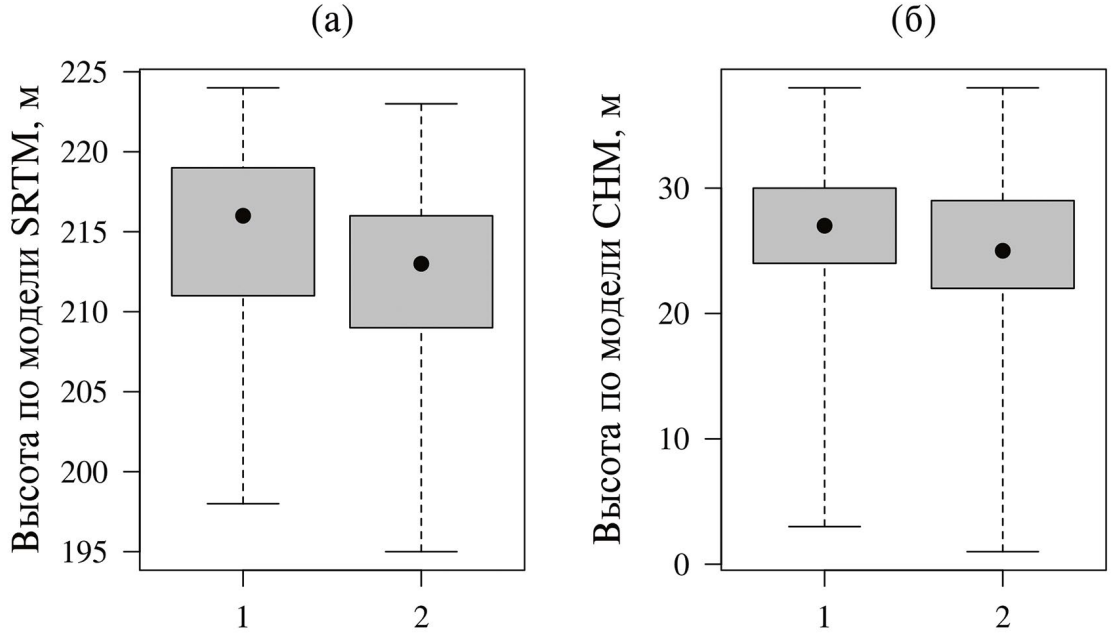

Рис. 5. Высоты местности (а) и древостоя (б) на поврежденных (1) и неповрежденных (2) ветровалом участках “ядра” заповедника. Границы прямоугольников показывают 1-й и 3-й квартили, усы – размах, точки – средние значения.

Необходимо отметить, что количественный анализ факторов, влияющих на наличие ветровальных повреждений, стал возможен только благодаря совместному анализу глобальных данных. В то же время было выяснено, что данные GBIF пока нерепрезентативны для исследованной территории, что ограничивает возможности их использования. Улучшить эту ситуацию могли бы оцифровка и публикация данных научных архивов заповедника. Необходимость и значимость оцифровки Летописей природы и других материалов, собираемых на особо охраняемых природных территориях, неоднократно обсуждалась в литературе [36, 37]. Имеющийся опыт совместного анализа уже оцифрованных данных с охраняемых природных территорий свидетельствует о высоком потенциале этой информации для решения как глобальных [38], так и региональных [39] задач.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполнена оценка повреждений древостоев малонарушенных южнотаежных лесов “ядра” заповедника “Кологривский лес” вследствие катастрофического ветровала. На основе дешифрирования данных Sentinel-2 показано, что древостои повреждены на площади 277.9 га, что составляет 40.5% от всего массива. Повреждения имеют гетерогенный характер и вносят разнонаправленный вклад в формирование мозаики окон возобновления.

Обобщение материалов собственных предыдущих исследований и данных глобального портала GBIF, а также общедоступных моделей высот позволило выполнить количественный анализ факторов, влияющих на наличие ветровальных нарушений. Показано, что древостои, расположенные на бóльших относительных высотах, более подвержены ветровалу. Среди факторов на уровне древостоя значимое влияние имеют высота полога и доминант древесного яруса. Более уязвимыми к влиянию ветра были более высокие древостои. Наиболее ветровальными были древостои с доминированием ели, наименее пострадали липняки.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена в рамках тем государственного задания ИМПБ РАН – филиала ИПМ им. М.В. Келдыша РАН, ФИЦ ПНЦБИ РАН и Государственного заповедника “Кологривский лес”. Никаких дополнительных грантов на проведение или руководство данным конкретным исследованием получено не было.

СОБЛЮДЕНИЕ ЭТИЧЕСКИХ СТАНДАРТОВ

Настоящая статья не содержит исследований с участием людей или животных в качестве объектов изучения.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы данной работы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *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. https://dx.doi.org/10.1016/S0378-1127(00)00307-8
2. *Gardiner B.* Wind damage to forests and trees: a review with an emphasis on planted and managed forests // Journal of Forest Research. 2021. V. 26. № 4. P. 248–266. https://doi.org/10.1080/13416979.2021.1940665
3. *Seidl R., Schelhaas M.-J., Lexer M.J.* Unraveling the drivers of intensifying forest disturbance regimes in Europe // Global Change Biology. 2011. V. 17. P. 2842–2852. https://dx.doi.org/10.1111/j.1365-2486.2011.02452.x
4. *Baumann M., Ozdogan M., Wolter P.T.* et al. Landsat remote sensing of forest windfall disturbance // Remote Sensing of Environment. 2014. V. 143. P. 171–179. https://doi.org/10.1016/j.rse.2013.12.020
5. *Kislov D.E., Korznikov K.A.* Automatic windthrow detection using very-high-resolution satellite imagery and deep learning // Remote Sensing. 2020. V. 12. № 7. Art. 1145. https://doi.org/10.3390/rs12071145
6. *Lazecky M., Wadhwa S., Mlcousek M.* et al. Simple method for identification of forest windthrows from Sentinel-1 SAR data incorporating PCA // Procedia Computer Science. 2021. V. 181. P. 1154–1161. https://doi.org/10.1016/j.procs.2021.01.312
7. *Olmo V., Tordoni E., Petruzzellis F.* et al. Use of Sentinel-2 satellite data for windthrows monitoring and delimiting: the case of “Vaia” storm in Friuli Venezia Giulia region (North-Eastern Italy) // Remote sensing. 2021. V. 13. Art. 1530. https://dx.doi.org/10.3390/rs13081530
8. *Phillips S.J., Anderson R.P., Schapire R.E.* Maximum entropy modeling of species geographic distributions // Ecological Modelling. 2006. V. 190. P. 231–259. https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2005.03.026
9. *Poggio L., de Sousa L.M., Batjes N.H.* et al. SoilGrids 2.0: producing soil information for the globe with quantified spatial uncertainty // SOIL. 2021. V. 7. P. 217–240. https://doi.org/10.5194/soil-7-217-2021

10. Nature Map Explorer 2021. https://explorer.naturemap.earth/ (1.11.2022).
11. *Santoro M., Cartus O., Carvalhais N.* et al. The global forest above-ground biomass pool for 2010 estimated from high-resolution satellite observations // Earth System Science Data. 2021. V. 13. P. 3927–3950. https://doi.org/10.5194/essd-13-3927-2021
12. *Farr T.G., Rosen P.A., Caro E.* et al. The shuttle radar topography mission // Reviews of Geophysics. 2007. V. 45. Art. RG2004. https://doi.org/10.1029/2005RG000183
13. *Lang N., Jetz W., Schindler K.* et al. A high-resolution canopy height model of the Earth 2022. https://langnico.github.io/globalcanopyheight/
14. *Potapov P., Hansen M.C., Pickens A.* et al. The global 2000–2020 land cover and land use change dataset derived from the Landsat archive: first results // Frontiers in Remote Sensing. 2022. V. 3. Art. 856903. https://doi.org/10.3389/frsen.2022.856903
15. *Heberling J.M., Miller J.T., Noesgaard D.* et al. Data integration enables global biodiversity synthesis // Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America. 2021. V. 118. № 6. Art. e2018093118. https://doi.org/10.1073/pnas.2018093118
16. Кологривский лес: Экологические исследования. М: Наука, 1986. 128 с.
17. *Хорошев А.В., Немчинова А.В., Кощеева А.С.* и др. Ландшафтные и сукцессионные факторы соотношения неморальных и бореальных свойств травяного яруса в заповеднике “Кологривский лес” // Вестник Московского гос. ун-та. Серия 5: География. 2013. № 5. С. 11–18.
18. *Иванов А.Н., Буторина Е.А., Балдина Е.А.* Многолетняя динамика коренных южно-таежных ельников в заповеднике “Кологривский лес” // Вестник Московского гос. ун-та. Серия 5: География. 2012. № 3. С. 74–79.
19. *Ivanova N.V., Shashkov M.P.* Tree stand assessment before and after windthrow based on open-access biodiversity data and aerial photography // Nature Conservation Research. 2022. V. 7. Suppl. 1. P. 52–63. https://dx.doi.org/10.24189/ncr.2022.018
20. *Chen D., Huang J., Jackson T.J.* Vegetation water content estimation for corn and soybeans using spectral indices derived from MODIS near- and short-wave infrared bands // Remote Sensing of Environment. 2005. V. 98. P. 225–236. https://doi.org/10.1016/j.rse.2005.07.008
21. *Абатуров Ю.Д., Письмеров А.В., Орлов А.Я.* и др. Коренные темнохвойные леса южной тайги (резерват “Кологривский лес”). М.: Наука, 1988. 220 с.
22. *Лебедев А.В., Чистяков С.А.* Долговременные наблюдения на пробных площадях в древостоях ядра заповедника “Кологривский лес” // Вклад ООПТ в экологическую устойчивость регионов. Современное состояние и перспективы: Мат-лы конф. Кологрив: ГПЗ “Кологривский лес”, 2021. С. 31–43.
23. *Ivanova N.V.* Factors limiting distribution of the rare lichen species *Lobaria pulmonaria* (in forests of the Kologriv Forest Nature Reserve) // Biology Bulletin. 2015. V. 42. № 2. P. 145–153. https://doi.org/10.1134/S1062359015020041
24. *Иванова Н.В., Терентьева Е.В.* Состояние популяций охраняемого лишайника *Lobaria pulmonaria* в лесах северо-востока Костромской области // Вестник Томского гос. ун-та. Биология. 2017. № 38. С. 149–166. https://doi.org/10.17223/19988591/38/9
25. GBIF.org (16 April 2022) GBIF Occurrence Download. https://doi.org/10.15468/dl.qzgpn2 (1.11.2022)
26. *Jarvis A., Reuter H.I., Nelson A.* et al. Hole-filled seamless SRTM data V4, International Centre for Tropical Agriculture (CIAT). 2008. http://srtm.csi.cgiar.org (29.12.2022).
27. *Potapov P., Li X., Hernandez-Serna A.* et al. Mapping global forest canopy height through integration of GEDI and Landsat data // Remote Sensing of Environment. 2020. V. 253. Art. 112165. https://doi.org/10.1016/j.rse.2020.112165
28. R Core Team (2022). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL https://www.R-project.org/.
29. *Ribeiro P.J. Jr., Diggle P.J.* A package for geostatistical analysis // R-NEWS. 2001. V. 1. № 2. P. 15–18.
30. QGIS Development Team, 2022. QGIS Geographic Information System. Open Source Geospatial Foundation Project. http://qgis.osgeo.org.
31. *Taylor R.A., Dracup E., MacLean D.A.* et al. Forest structure more important than topography in determining windthrow during Hurricane Juan in Canada’s Acadian Forest // Forest Ecology and Management. 2019. V. 434. P. 255–263. https://dx.doi.org/10.1016/j.foreco.2018.12.026
32. *Ruel J.-C.* Understanding windthrow: silvicultural implications // The Forestry Chronicle. 1995. V. 71. № 4. P. 434–445. https://dx.doi.org/10.5558/tfc71434-4
33. *Бобровский М.В., Стаменов М.Н.* Влияние катастрофического ветровала 2006 года на структуру и состав лесной растительности заповедника “Калужские засеки” // Лесоведение. 2020. № 6. С. 523–236. https://doi.org/10.31857/S0024114820050022
34. *Богачев А.В.* Лесотаксационные исследования. М.: ВНИИЛМ, 2007. 344 с.
35. *Pretzsch H.* The effect of tree crown allometry on community dynamics in mixed-species stands versus monocultures. A review and perspectives for modeling

and silvicultural regulation // Forests. 2019. V. 10. № 9. Art. 810.
https://doi.org/10.3390/f10090810
36. *Ovaskainen O., Meyke E., Lo K.* et al. Chronicles of nature calendar, a long-term and large-scale multitaxon database on phenology // Scientific Data. 2020. V. 7. Art. 47.
https://doi.org/10.1038/s41597-020-0376-z
37. *Буйволов Ю.А., Минин А.А., Черногаева Г.М.* Летопись природы – вызовы и возможности // Использование и охрана природных ресурсов в России. 2022. № 1. С. 46–55.
38. *Roslin T., Antão L., Hällfors M.* et al. Phenological shifts of abiotic events, producers and consumers across a continent // Nature Climate Change. 2021. V. 11. P. 241–248.
https://doi.org/10.1038/s41558-020-00967-7
39. *Shashkov M.P., Bobrovsky M.V., Shanin V.N.* et al. Data on 30-year stand dynamics in an old-growth broad-leaved forest in the Kaluzhskie Zaseki State Nature Reserve, Russia // Nature Conservation Research. 2022. V. 7. Suppl. 1. P. 24–37.
https://dx.doi.org/10.24189/ncr.2022.013

QUANTITATIVE ANALYSIS OF FACTORS INFLUENCING DAMAGE TO OLD-GROWTH HEMIBOREAL STANDS AS A RESULT OF A CATASTROPHIC WINDTHROW, BASED ON REMOTE SENSING AND MERGED DATA

N. V. Ivanova[a, *], M. P. Shashkov[b], A. V. Lebedev[c, d], and V. N. Shanin[e]

[a] *Institute of Mathematical Problems of Biology, Russian Academy of Sciences – branch of the Institute for Problems of Mathematics, Russian Academy of Sciences, Russia 142290 Pushchino*
[b] *Karaganda University, Kazakhstan 100028 Karaganda*
[c] *Russian State Agrarian University – Moscow Agricultural Academy named after. K.A. Timiryazeva, Russia 127434 Moscow*
[d] *Kologrivsky Les Nature Reserve, Russia 157440 Kologriv*
[e] *Institute of Physicochemical and Biological Problems of Soil Science, Russian Academy of Sciences – a separate division of the Federal Research Center "Pushchino Scientific Center for Biological Research, Russian Academy of Sciences", Russia 142290 Pushchino*
**e-mail: Natalya.dryomys@gmail.com*

Abstract – The consequences of a catastrophic windthrow in a old-growth hemiboreal stands of the Kologrivsky Forest Reserve were investigated. The degree of damage to tree stands was assessed by interpretation of the Sentinel-2 satellite images. Data from the GBIF portal, SRTM global terrain height models, and tree stand heights were used for the quantitative analysis of factors affecting the presence of wind damage. It was found that tree stands on an area of 277.9 hectares (40.5% of the entire massif) were damaged by windthrow. The results of the analysis of height models and regression models showed that spruce stands are more vulnerable to wind damage, as well as stands of greater height or those growing at higher elevation on the ground.

Keywords: Kologrivsky Forest Reserve, GBIF, SRTM, CHM, Sentinel-2, NDWA-8a