ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ВЕТРОВАЛОВ В СЕВЕРНОЙ ЧАСТИ ЕВРОПЕЙСКОЙ РОССИИ ПО СПУТНИКОВЫМ ДАННЫМ LANDSAT

А.Н. Шихов¹, А.В. Чернокульский², И.О. Ажигов¹, А.В. Семакина¹

¹Пермский государственный национальный исследовательский университет, г. Пермь

²Институт физики атмосферы им М.А. Обухова РАН

E-mail: and3131@inbox.ru

Аннотация. Создана картографическая база данных ветровалов в северной части Европейской России на основе полного ряда спутниковых снимков Landsat. Помимо снимков Landsat и продуктов их тематической обработки, для наполнения базы данных использованы снимки сверхвысокого разрешения и различные источники дополнительной информации. Для каждого ветровала определены дата возникновения и ряд геометрических характеристик. Созданная база данных включает 543 случая ветровала на общей площади 268 тыс. га, что составляет приблизительно 0,2 % от площади лесопокрытой территории. Наибольшие площади ветровалов (свыше 1 % лесопокрытой территории) выявлены в Новгородской и Костромской областях, а также на Северном Урале. Многолетний тренд площади ветровалов статистически не значим, однако значимыми являются тренды по количеству случаев шкваловых и смерчевых ветровалов. Это может быть связано с неоднородностью созданного ряда по причине появления в открытом доступе в последние годы снимков сверхвысокого разрешения. Таким образом, объективно оценить многолетний тренд можно только для крупных ветровалов.

Ключевые слова: ветровалы, смерчи, шквалы, многолетняя динамика, снимки Landsat, данные Global Forest Change

Ветровалы, наряду с лесными пожарами являются важнейшим естественным фактором, формирующим динамику лесных экосистем бореальной зоны [1]. Масштабные (катастрофические) ветровалы представляют собой стихийные бедствия и наносят огромный ущерб лесному хозяйству и другим отраслям экономики.

В последние годы в странах Европы наблюдается рост площади ветровалов, который принято связывать с современным изменением климата. При реализации ожидаемых сценариев глобального потепления вероятно дальнейшее увеличение масштабов ветровальных нарушений лесного покрова [1, 2]. Оно может быть связано с ростом частоты и интенсивности конвективных явлений на фоне повышения среднегодовой температуры воздуха [3]. Учитывая это, исследования ветровальных нарушений лесного покрова становятся все более актуальными.

В Западной и Центральной Европе ветровалы обуславливают более 50 % от общей площади нарушений лесного покрова, вызванных природными факторами. Поэтому их изучение находится в центре внимания научного сообщества. В то же время в России вклад ветровалов в общую площадь нарушений лесного покрова значительно меньше, и исследований по данной тематике проводится немного.

По данным за 2002–2011 гг., в целом по территории России 65,4 % площади нарушений лесного покрова вызвано пожарами, около 30 % приходится

на вырубки и лишь 4,5 % – на ветровалы и усыхание лесов вследствие воздействия вредителей и болезней [4]. По территории Урала за 2000–2014 гг. площадь погибших лесов от ветровалов составляла менее 4 % от площади гибели лесов от пожаров [5]. В то же время в Европейской части России это соотношение существенно отличается. На Западном Урале и востоке Европейской территории России (ЕТР) на ветровалы приходится уже более 17 % площади гибели лесов от природных факторов, а в Пермском крае – свыше 37 % [6]. В некоторых регионах Европейской России (например, в Костромской области) ветровалы являются ведущим фактором нарушений лесного покрова [7].

Целью настоящего исследования является создание картографической базы данных ветровалов в лесной зоне ЕТР за период действия съемочной системы Landsat (с 1984 г. по н.в.). На основе многолетнего однородного ряда данных о крупных ветровалах впервые можно будет оценить межгодовую изменчивость и многолетний тренд их площади, а также климатическую обусловленность тренда.

Для создания картографической базы данных использована следующая исходная информация:

- полный архив спутниковых снимков Landsat TM/ETM+/OLI за период с 1984 г. по н.в.
- данные проекта Global Forest Change (GFC) за 2001–2018 гг. [8]
- данные проекта Eastern' Europe Forest Cover Change (EEFCC) за 1986–2000 гг. [9]

- снимки сверхвысокого разрешения с открытых картографических сервисов.
- дополнительные данные для определения дат ветровалов (данные метеостанций, сведения из СМИ об опасных явлениях погоды и вызванном ими ущербе, данные реанализа).

Наполнение базы данных о ветровалах

Дешифровочные признаки ветровалов по снимкам Landsat описаны в ряде работ [7, 10]. Эти же признаки могут быть использованы для выделения ветровалов по продуктам обработки снимков Landsat – GFC и EEFCC.

За период с 2001 по 2017 гг. контуры ветровалов в большинстве случаев были выделены автоматически на основе данных GFC в соответствии с методикой [5]. Оценки, приведенные в работе [8], показывают высокую точность выделения нарушений лесного покрова в бореальной зоне по этим данным – свыше 99 %. Также высокая точность выделения ветровалов по данным GFC была обоснована в работе [10] на примере смерчевых ветровалов. Для полученных контуров ветровалов выполнена экспертная верификация, которая включала разделение перекрывающихся участков ветровалов и рубок.

Для обнаружения ветровалов за период с 1986 по 2000 гг. использовались данные EEFCC [9]. В этих данных шаг по времени, с которым выделены нарушения лесного покрова, составляет от 6 до 12 лет, в то время как в Global Forest Change – 1 год. С приемлемой точностью контуры ветровалов можно выделить только в тех случаях, когда они не перекрываются с вырубками или гарями, произошедшими в предыдущие или последующие годы.

Ветровалы за период с 1986 по 2000 гг., расположенные в районах активной лесозаготовки, были выделены по разновременным снимкам Landsat. Небольшие по площади объекты были оцифрованы вручную, а крупные ветровалы, имеющие сложную веерную форму – выделены по методике, основанной на разности вегетационного индекса SWVI [11]. Пример выделения ветровала веерной формы приведен на рис. 1. За период до появления данных EEFCC (1984–1986 гг.) были выделены только самые крупные ветровалы, связанные с известными штормовыми событиями, в частности со вспышкой смерчей 9 июня 1984 г. [12].

Для каждого ветровала был определен тип вызвавшего его явления погоды – шквал, смерч, штормовой ветер или сильный снегопад. Ветровалы, вызванные смерчами, были выделены на основе методики [10], с привлечением снимков

сверхвысокого разрешения с открытых картографических сервисов. За период до начала 2000-х гг., когда снимки сверхвысокого разрешения отсутствуют, определение типа явления, вызвавшего ветровал, имеет меньшую точность

Ветровалы, вызванные неконвективными явлениями (штормовыми ветрами или сильными снегопадами) в России случаются редко, в отличие от стран Западной Европы. Однако их площади весьма велики. Всего было выявлено три таких случая: 7 августа 1987 г. в Новгородской области, 6 июня 1995 г. на Среднем Урале и 8 октября 2015 г. на Северном Урале.

Для каждого ветровала были определены основные геометрические характеристики (площадь, протяженность, средняя и максимальная ширина). Стоит отметить, что распределение ветровалов по площади крайне неравномерно, на 10 % наиболее крупных ветровалов приходится свыше 70 % от их общей площади (рис. 2). При сборе данных не учитывались смерчевые ветровалы площадью менее 5 га и прочие на площади менее 25 га. Разные критерии отбора связаны с тем, что ветровалы, вызванные смерчами, обычно состоят из небольшого числа участков сплошного нарушения лесного покрова и проще идентифицируются по снимкам, в то время как веерные ветровалы включают множество небольших по площади участков.

Наибольший интерес представляет определение дат ветровалов, необходимое для оценки условий их возникновения. Для этого использовались все доступные снимки Landsat, а также комплекс дополнительных данных – данные метеостанций, обзоры опасных явлений погоды из журнала «Метеорология и гидрология» сведения из СМИ и данные реанализа. В результате удалось установить даты более 40 % выявленных случаев ветровалов. Определены даты возникновения для 46 из 50 случаев наиболее крупных ветровалов (на площади свыше 1000 га), поскольку эти случаи часто упоминаются в СМИ, либо штормовые события, вызвавшие ветровал были зафиксированы метеостанциями. Только в 11 случаях метеостанции попадали непосредственно в зону сильного шквала или смерча, вызвавшего крупный ветровал. При этом измеренные скорости ветра в порывах составляют от 23 м/с до 38 м/с.

В настоящее время завершен сбор данных о ветровалах для территории Северо-Западного, Приволжского федеральных округов и Костромской области. Созданная база данных включает 543 случая ветровала на общей площади 268 тыс. га, что составляет приблизительно 0,2 % от площади лесопокрываемой территории (рис. 3).

Рис. 1. Выделение ветровала на основе разности индекса SWVI, рассчитанной по снимкам *Landsat* в пределах лесопокрываемой территории: а – снимок до ветровала, б – снимок после ветровала, в – разность SWVI, г – выделение нарушений лесного покрова

Рис. 2. Распределение ветровалов по площади (кривые Лоренца). 1 – смерчевые ветровалы, 2 – ветровалы от шквалов и неконвективных явлений (сильные ветра, снеголомы)

Рис. 3. Пространственное распределение ветровалов в северной части Европейской России за период 1986–2017 гг.

Рис. 4. Межгодовая изменчивость количества случаев и площади ветровалов за период 1986–2017 гг.

Наибольшие площади ветровалов относительно лесопокрытой территории (свыше 1 %) выявлены в Новгородской и Костромской областях, а также на Северном Урале. Более половины выявленных случаев ветровалов вызваны смерчами, однако на них приходится всего 11,5 % от общей площади

ветровалов. Свыше 80 % общей площади приходится на ветровалы от шквалов. Наиболее катастрофические ветровалы вызываются так называемыми «деречо» – шквалами с большим охватом территории и протяженностью полосы разрушений свыше 300 км. Подобные события наблюдались 16.06.2009 г.

в Кировской области, 27.06.2010 г. в Ярославской и Вологодской областях, 29–30.07.2010 г. в Новгородской, Ленинградской области и Карелии, 18.07.2012 г. в Пермском крае и Республике Коми. Площадь вызванных ими ветровалов в изучаемом регионе составляет свыше 145 тыс. га.

Поскольку крупные ветровалы являются редкими событиями, их межгодовое распределение крайне неравномерно (рис. 4). Наибольшие площади ветровалов зафиксированы в 2010 г., а наибольшее число штормовых событий (включая смерчи) – в 2009 г. В то же время в отдельные годы (1994, 1997, 2002, 2011) крупные ветровалы не зафиксированы.

Для определения многолетнего тренда количества случаев ветровалов и их площади рассчитаны коэффициенты ранговой корреляции Спирмена (R). Многолетний тренд площади всех ветровалов статистически не значим ($R = 0,21$), в то же время тренд площади смерчевых ветровалов статистически значим ($R = 0,46$). Значимыми являются тренды по годовому количеству всех ветровалов ($R = 0,65$) и смерчевых ветровалов ($R = 0,70$), однако это можно объяснить неоднородностью ряда наблюдений за счет появления снимков более высокого разреше-

ния. Таким образом, корректно можно оценивать многолетний тренд только для крупных ветровалов.

Заключение

Многолетние данные о ветровалах являются ценнейшим источником информации о вызывающих их смерчах и шквалах, особенно в районах с низкой плотностью населения и сети метеостанций, к которым относится северная часть ЕТР. Представленные результаты являются предварительными, поскольку в настоящее время продолжается работа по формированию базы данных для территории Центрального федерального округа. По окончании формирования базы данных для всей лесной зоны ЕТР планируется оценить связь появления сильных шквалов и смерчей, вызывающих ветровалы, с различными формами атмосферной циркуляции. Вторым направлением исследования будет оценка риска возникновения ветровалов в зависимости от свойств лесных насаждений, ландшафтных факторов и климатических условий территории.

Исследование проведено при финансовой поддержке РФФИ, проект № 19-05-00046-а

Список литературы

1. Seidl R., Thom D., Kautz M., Martin-Benito D., Peltoniemi M., Vacchiano G., Wild J., Ascoli D., Petr M., Honkaniemi J., Lexer M.J., Trotsiuk V., Mairota P., Svoboda M., Fabrika M., Nagel T.A., Reyser C.P.O. Forest disturbances under climate change // *Nature Climate Change*. 2017. Vol. 7(6), PP. 395–402.
2. Seidl R., Schelhaas M.J., Lexer M.J. Unraveling the drivers of intensifying forest disturbance regimes in Europe // *Global Change Biology*. 2011. Vol. 17(9), PP. 2842–2852.
3. Schlyter P., Stjernquist I., Barring L., Jönsson A.M., Nilsson C. Assessment of the impacts of climate change and weather extremes on boreal forests in northern Europe, focusing on Norway spruce // *Climate Research*. 2006. Vol. 31, PP. 75–84.
4. Krylov A., Potapov P., Loboda T., Tyukavina A., Turubanova S., Hansen M.C., McCarty J.L. Remote sensing estimates of stand-replacement fires in Russia, 2002–2011 // *Environ Res Lett* 2014. Vol. 9(10), Article Number 105007.
5. Shikhov A.N., Perminova E.S., Perminov S.I. Satellite-based analysis of the spatial patterns of fire and storm-related forest disturbances in the Ural region, Russia // *Natural Hazards*. 2019. Available online at <https://doi.org/10.1007/s11069-019-03642-z>
6. Шихов А.Н., Зарипов А.С. Многолетняя динамика потерь лесов от пожаров и ветровалов на северо-востоке Европейской России по спутниковым данным // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2018. Т. 15. № 7. С. 114–128.
7. Петухов И.Н., Немчинова А.В. Ветровальные нарушения лесного покрова в Костромской области и на сопредельных территориях в 1984–2011 гг. // *Лесоведение*. 2014. №6. С. 17–25.
8. Hansen M.C., Potapov P.V., Moore R., Hancher M., Turubanova S.A., Tyukavina A., Thau D., Stehman S.V., Goetz S.J., Loveland T.R., Kommareddy A., Egorov A., Chini L., Justice C.O., Townshend J.R.G.. High-Resolution Global Maps of 21st-Century Forest Cover Change // *SCIENCE*. 2013. Vol. 342. P. 850–853.
9. Potapov P.V., Turubanova S.A., Tyukavina A., Krylov A.M., McCarty J.L., Radeloff V.C., Hansen M.C. Eastern Europe's forest cover dynamics from 1985 to 2012 quantified from the full Landsat archive // *Remote Sensing of Environment*. 2015. Vol. 159. PP. 28–43.
10. Shikhov A.N., Chernokulsky A.V. A satellite-derived climatology of unreported tornadoes in forested regions of northeast Europe // *Remote Sensing of Environment*. 2018. Vol. 204. PP. 553–567.
11. Крылов А.М., Владимирова Н.А. Дистанционный мониторинг состояния лесов по данным космической съемки // *Геоматика*, 2011, № 3, С. 53–58.
12. Chernokulsky A.V., Shikhov A.N. 1984 Ivanovo tornado outbreak: Determination of actual tornado tracks with satellite data // *Atmospheric Research* 2018. Vol. 207. PP. 111–121.

SPATIO-TEMPORAL DISTRIBUTION OF WINDTHROWS IN THE NORTHERN PART OF THE EUROPEAN RUSSIA WITH LANDSAT IMAGES

A.N. Shikhov¹, A.V. Chernokulsky², I.O. Azhigov¹, A.V. Semakina¹

¹Perm State University, Perm

²A.M.Obukhov Institute of Atmospheric Physics Academy of Sciences

E-mail: and3131@inbox.ru

Abstract. It is created a GIS dataset of windthrows events for the northern part of the European Russia based on full Landsat data archive (from 1986 to 2017). In addition to Landsat images and Landsat-based Global Forest Change and Eastern Europe forest cover change datasets, we used high-resolution images and other information to collect the data on windthrow events. We determine the dates of occurrence and some geometrical parameters for each windthrow. The developed dataset includes 543 windthrows with a total area of 268 thous. ha, that corresponds 0.2 % of forest-covered area. The largest areas of windthrows (over 1 % of the forested area) are found in the Novgorod and Kostroma regions, as well as in the Northern Urals. The long-term trend of windthrows area is statistically insignificant. However, the trends of the number of the windthrows-related squall and tornado events are significant. This may be due to the windthrows data series is not homogeneous, since the high-resolution images are available only for several last years. Thus, it is possible to objectively estimate the long-term trend only for large-scale windthrows. The highest number of squall events is reported in 2012, and tornadoes occurred most often in 2009. In the same time, 2010 is characterized by highest windthrows area (>120 thous. ha), which is due to two severe storms (derechoes) which occurred 27 June 2010 and 29–30 July 2010.

Keywords: windthrows, squalls, tornadoes, long-term variability, Landsat images, Global Forest Change data

References

1. Seidl R., Thom D., Kautz M., Martin-Benito D., Peltoniemi M., Vacchiano G., Wild J., Ascoli D., Petr M., Honkaniemi J., Lexer M.J., Trotsiuk V., Mairota P., Svoboda M., Fabrika M., Nagel T.A., Reyer C.P.O. Forest disturbances under climate change. *Nature Climate Change*. 2017. Vol. 7(6), PP. 395–402.
2. Seidl R., Schelhaas M.J., Lexer M.J. Unraveling the drivers of intensifying forest disturbance regimes in Europe. *Global Change Biology*. 2011. Vol. 17(9), PP. 2842–2852.
3. Schlyter P., Stjernquist I., Barring L., Jönsson A.M., Nilsson C. Assessment of the impacts of climate change and weather extremes on boreal forests in northern Europe, focusing on Norway spruce. *Climate Research*. 2006. Vol. 31, PP. 75–84.
4. Krylov A., Potapov P., Loboda T., Tyukavina A., Turubanova S., Hansen M.C., McCarty J.L. Remote sensing estimates of stand-replacement fires in Russia, 2002–2011 // *Environ Res Lett* 2014. Vol. 9(10), Article Number 105007.
5. Shikhov A.N., Perminova E.S., Perminov S.I. Satellite-based analysis of the spatial patterns of fire and storm-related forest disturbances in the Ural region, Russia. *Natural Hazards*. 2019. Available online at <https://doi.org/10.1007/s11069-019-03642-z>
6. Shikhov A.N., Zaripov A.S. Mnogoletnyaya dinamika poter' lesov ot pozharov i vetrovalov na severo-vostoke Evropeiskoi Rossii po sputnikovym dannym [Long-term dynamics of fire-and wind-related forest losses in the north-east of European Russia by satellite data]. *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*. 2018. Vol. 15. No. 7. pp. 114–128.
7. Petukhov I.N., Nemchinova A.V. Vetroval'nye narusheniya lesnogo pokrova v Kostromskoi oblasti i na soprodel'nykh territoriyakh v 1984–2011 gg [wind-related forest disturbances in the Kostroma region and adjacent area in 1984–2011]. *Lesovedenie*. 2014. No. 6. pp. 17–25.
8. Hansen M.C., Potapov P.V., Moore R., Hancher M., Turubanova S.A., Tyukavina A., Thau D., Stehman S.V., Goetz S.J., Loveland T.R., Kommareddy A., Egorov A., Chini L., Justice C.O., Townshend J.R.G. High-Resolution Global Maps of 21st-Century Forest Cover Change // *SCIENCE*. 2013. Vol. 342. pp. 850–853.
9. Potapov P.V., Turubanova S.A., Tyukavina A., Krylov A.M., McCarty J.L., Radeloff V.C., Hansen M.C. Eastern Europe's forest cover dynamics from 1985 to 2012 quantified from the full Landsat archive. *Remote Sensing of Environment*. 2015. Vol. 159. Pp. 28–43.
10. Shikhov A.N., Chernokulsky A.V. A satellite-derived climatology of unreported tornadoes in forested regions of northeast Europe. *Remote Sensing of Environment*. 2018. Vol. 204. PP. 553–567.
11. Krylov A.M., Vladimirova N.A. Distantionnyi monitoring sostoyaniya lesov po dannym kosmicheskoi s'emki [Remote monitoring of forest health by satellite imagery data]. *Geomatika*. 2011. No. 3. pp. 53–58.
12. Chernokulsky A.V., Shikhov A.N. 1984 Ivanovo tornado outbreak: Determination of actual tornado tracks with satellite data // *Atmospheric Research*. 2018. Vol. 207. pp. 111–121.