

## Влияние массового ветровала в широколиственном лесу на свойства песчаных и суглинистых почв

Ханина Л.Г.<sup>1</sup>, Бобровский М.В.<sup>1,2</sup>, Смирнов В.Э.<sup>1,3</sup>, Иващенко К.В.<sup>2</sup>, Журавлева А.И.<sup>2</sup>, Жмайлов И.В.<sup>4</sup>

<sup>1</sup>*Институт математических проблем биологии РАН – филиал Института прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН*

<sup>2</sup>*Институт физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН – обособленное подразделение ФИЦ НЦБИ РАН*

<sup>3</sup>*Центр по проблемам экологии и продуктивности лесов РАН*

<sup>4</sup>*Федеральное бюджетное учреждение «Российский музей леса»*

[khanina.larisa@gmail.com](mailto:khanina.larisa@gmail.com)

Серии однофакторных дисперсионных анализов применялись для исследования эффектов массового ветровала на характеристики почв широколиственного леса в экотопах флювиогляциальных песков и покровных суглинков. Исследование проводили через 14 и 15 лет после массового ветровала в заповеднике «Калужские засеки». В качестве потенциальных факторов, влияющих на физико-химические и микробиологические свойства почв, исследовались: (1) тип экотопа – пески и суглинки; (2) место взятия пробы (биотоп) – под валежом, рядом с валежом, вне ветровала; (3) вид упавшего дерева. Выявлено, что на суглинках многие показатели активности и богатства почвы максимальны на участке массового ветровала, но не под лежащими стволами, а рядом с ними; в целом на массовом ветровале на суглинках происходит существенное увеличение емкости катионного обмена и снижение кислотности почвы. На песках обогащение почвы на массовом ветровале проявлялось в уменьшении отношения C/N и повышении микробиологической активности почв – увеличении содержания микробной биомассы и скорости базального дыхания; также наблюдалась более сильная зависимость почвенных характеристик от вида упавшего дерева; мало различались свойства почвенных проб, взятых под и рядом с валежом.

*Ключевые слова: однофакторный дисперсионный анализ, валеж, крупные древесные остатки, химические свойства почвы, микробиологические характеристики почвы.*

## Effects of mass windthrow in broad-leaved forest on characteristics of sandy and loamy soils

Khanina L.G.<sup>1</sup>, Bobrovsky M.V.<sup>1,2</sup>, Smirnov V.E.<sup>1,3</sup>, Ivashchenko K.V.<sup>2</sup>, Zhuravleva A.I.<sup>2</sup>, Zhmaylov I.V.<sup>4</sup>

<sup>1</sup>*Institute of Mathematical Problems of Biology of RAS – branch of the M.V. Keldysh Institute of Applied Mathematics of RAS*

<sup>2</sup>*Institute of Physico-Chemical and Biological Problems in Soil Sciences of RAS, PSCBR RAS*

<sup>3</sup>*Center for Forest Ecology and Productivity of RAS*

<sup>4</sup>*Russian Forest State Museum*

A series of one-way ANOVA was used to study the effects of mass windthrow on the soil properties in broad-leaved forests in ecotopes of fluvio-glacial sands and sandy-loams. The study was conducted 14 and 15 years after the mass windthrow in the Kaluzhskie Zaseki State Nature Reserve. Potential factors influencing physicochemical and microbiological properties of soils were investigated as (1) ecotope type - sands and sandy-loams; (2) sampling location (biotope) - beneath dead wood, near dead wood, outside windthrow area; (3) fallen tree species identity. It was found that in sandy-loams, many indicators of activity and soil richness are maximal within the area of mass windthrow, however not under the lying trunks, but next to them; a significant increase in the capacity of cation exchange and reduction of soil acidity occurs in the mass windthrow area. On sands, soil enrichment at the windthrow area is evident by a decrease in the C/N ratio and an increase in the microbiological activity of soils: an increase in the content of microbial biomass and basal respiration rate; a stronger dependence of soil characteristics on tree species identity is also observed; the properties of soil samples taken under and near the deadwood were not very different.

## 1. Введение

Падение деревьев в лесу (ветровалы) являются природным нарушением, происходящим, как правило, в результате сильных порывов ветра. Оценки вкладов древесного детрита, образующегося в большом количестве после массовых ветровалов, в циклы биофильных элементов, общий баланс углерода, запас органического вещества почвы весьма противоречивы [1, 2] и требуют проведения детальных исследований. Ветровалы в равнинных широколиственных лесах изучены крайне слабо, что отчасти является следствием относительной редкости этих лесов в настоящее время. Однако в условиях потепления климата площадь широколиственных лесов может заметно увеличиваться [3], что определяет особую важность и актуальность их изучения. В данном исследовании дисперсионный анализ был применен для оценки влияния массовых ветровалов на физико-химические и микробиологические свойства почв широколиственных лесов.

## 2. Методы

Образцы почв были собраны в 2020 и 2021 гг. в экотопах флювио-гляциальных песков (почвы дерново-подзолы, Podzols и Arenosols по классификации WRB [4]) и покровных суглинков (почвы дерново-подзолистые, Luvisols) на двух участках массового ветровала, произошедшего в 2006 г. в широколиственном лесу в заповеднике «Калужские засеки» [5]. Почвенные образцы брали под упавшими стволами разных видов деревьев и рядом с этими стволами внутри участков массового ветровала, а также в лесу, незатронутом ветровалом. Всего было отобрано 120 образцов из верхнего органо-минерального слоя (0–7 см). На участках массового ветровала на песках взято 62 парных образца под и рядом со стволами 6 видов деревьев березы – *Betula* spp., ели европейской – *Picea abies*, липы мелколистной – *Tilia cordata*, осины обыкновенной – *Populus tremula*, дуба черешчатого – *Quercus robur* и клена остролистного – *Acer platanoides*; на суглинках 38 парных образцов под и рядом со стволами 5 видов деревьев ели, осины, клена остролистного, ясеня обыкновенного – *Fraxinus excelsior* и вяза шершавого – *Ulmus glabra*. Также было отобрано по 10 образцов в каждом экотопе вне участков массового ветровала.

В лаборатории для каждого образца были определены физико-химические характеристики (в ЦКП ИФХиБПП РАН, ПНЦБИ РАН): плотность почвы ( $\text{г см}^{-3}$ ), pH, содержания подвижных форм фосфора и калия ( $\text{P}_2\text{O}_5$  и  $\text{K}_2\text{O}$ ), содержание обменных катионов  $\text{Ca}^{2+}$  и  $\text{Mg}^{2+}$ , емкость катионного обмена ЕКО [6], содержание углерода и азота

(CHNS-анализатор Leco Corp., USA). Среди микробных свойств почвы были определены: содержание углерода микробной биомассы методом субстрат-индуцированного дыхания [7], базальное дыхание почвы – скорость образования углекислого газа микроорганизмами с использованием газового хроматографа [8, 9], активность ферментов методом флюорогенно-меченых субстратов [10]  $\beta$ -D-глюкозидазы и лейцинаминопептидазы (ЛАП), соответствующих в циклах углерода и азота, соответственно, а также был проанализирован физиологический профиль микробного сообщества почвы. Последнее было оценено техникой MicroResp™, при которой регистрировались отклики микробного сообщества на внесения 14-ти разнообразных субстратов группы аминокислот, углеводов, карбоновых и фенольных кислот [11, 12]. Эффективность разложения органического вещества почвы оценена через микробный метаболический коэффициент ( $q\text{CO}_2$ ), равный отношению базального дыхания к углероду микробной биомассы.

Среди потенциальных факторов, влияющих на физико-химические и микробиологические свойства почвы, были выбраны: (1) тип экотопа – пески и суглинки; (2) место взятия пробы (биотоп) – под / рядом с валежом, вне ветровала; (3) вид упавшего дерева. В качестве величины эффекта были рассчитаны величины  $R^2$ : отношения межгрупповой суммы квадратов отклонений к общей сумме квадратов в дисперсионном комплексе. Расчеты были выполнены в среде статистического программирования R [13]. Всем значениям  $R^2$ , которые далее обсуждаются, соответствуют  $p$ -значения не превышающие 0.05.

## 3. Результаты

Выявлены принципиальные различия в воздействии массового ветровала многовидового широколиственного леса на свойства почв в экотопах флювио-гляциальных песков и покровных суглинков.

На песках физико-химические свойства дерново-подзолов на ветровале и на участке вне массового ветровала значимо не различались. Только отношения C/N было значимо ниже на ветровале и составляло в среднем  $12.5 \pm 1.6$  (SD здесь и далее) против  $14.1 \pm 2.0$  вне массового ветровала ( $R^2 = 0.13$ ). Содержание микробной биомассы и скорость базального дыхания были значимо выше (на 47 и 55 %) на ветровале по сравнению с фоновыми участком. На ветровале варьирование 90 % всех рассмотренных характеристик значимо объяснялось видовой принадлежностью валежа (до 76 % варьирования), а не местом взятия пробы, как было получено в ряде исследований [14, 15]. Не

наблюдалось разницы участков под стволами и рядом со стволами, а также вне массового ветровала по физиологическому профилю микробиома почвы. Только удельное дыхание микробного сообщества  $qCO_2$  (дыхание на единицу биомассы) было значимо выше под стволами, чем на участках без стволов.

Дерново-подзолистые почвы на суглинках по сравнению с почвами на песках в большей степени различались по химическим характеристикам между участком массового ветровала и за его пределами, а также по месту взятия пробы под или рядом с бревном. На ветровале в целом и особенно между лежащими стволами на 40 % была выше емкость катионного обмена, чем в фоновом лесу: средние значения ЕКО были  $17.9 \pm 2.7$ ,  $17.7 \pm 4.6$  и  $10.6 \pm 2.8$  ммоль(экв)/100 г ( $R^2 = 0.42$ ) между стволами, под стволами и вне ветровала, соответственно. Кислотность почвы была значимо ниже на массовом ветровале: средние значения pH  $6.1 \pm 0.3$ ,  $6.6 \pm 0.8$  и  $5.7 \pm 0.3$  ( $R^2 = 0.28$ ) для тех же биотопов, соответственно. На ветровале между стволами наблюдались максимальные значения C и N ( $R^2 = 0.14$  и  $0.24$ ):  $3.4 \pm 0.6$  % и  $0.29 \pm 0.05$  % vs  $2.9 \pm 0.3$  % и  $0.24 \pm 0.02$  % (вне массового ветровала) и  $2.95 \pm 0.8$  % и  $0.24 \pm 0.05$  % (под бревнами). Выявлена небольшая, но значимая разница между местом отбора образцов под/рядом с бревном для большинства микробиологических характеристик почвы: под стволом были ниже показатели микробной биомассы ( $1159.5$  vs  $741.6484$   $\mu\text{g C g}^{-1}$ ) и базального дыхания ( $1.4$  vs  $1.1$   $\mu\text{g C g}^{-1} \text{ h}^{-1}$ ). Последнее было минимальным вне ветровала ( $0.9$   $\text{C g}^{-1} \text{ h}^{-1}$ ). Также как и на песках, удельное дыхание микробного сообщества на суглинках  $qCO_2$  было существенно выше на участке массового ветровала, чем в фоне ( $R^2 = 0.34$ ). На массовом ветровале в целом наблюдали значимое уменьшение откликов микробного сообщества на внесение большинства органических субстратов – аминокислот, углеводов, фенольных кислот ( $R^2 = 0.29$ ,  $0.28$  и  $0.14$ ; соответственно). В образцах, отобранных под стволами, отмечено уменьшение дыхательного отклика микробиома на карбоновые кислоты (аскорбиновая и лимонная кислоты) и углеводы (глюкоза, фруктоза и галактоза) по сравнению с образцами, отобранными на участках без стволов. Выявлено, что под стволами ели и клена отклик микробного сообщества почвы на менее доступные мономеры – фенольные кислоты (производные ароматических углеводов) – ниже, чем на участках рядом со стволами. Уменьшение откликов в данном случае может свидетельствовать о насыщенности почв на массовом ветровале на суглинках соответствующими органическими субстратами вследствие большого количества разнообразного органического материала. Отметим, что помимо лежащих стволов, участок ветровала характеризуется лучшей освещенностью (по сравнению с фоновым лесом) и наличием

неморального и нитрофильного высокотравья с богатым опадом.

В отличие от песков, где вид лежащего ствола определял вариацию практически всех характеристик, на суглинистых почвах видовой принадлежность валежа значимо определяла лишь вариацию значения pH (среднее было минимальным под и рядом с елью  $5.7 \pm 0.4$  против максимального под и рядом с вязом  $6.8 \pm 0.6$ ). Помимо этого, вид валежа значимо определял все измеренные для суглинок характеристики ферментативной активности почвы (и только эти характеристики микробиологической активности). А именно: 90 % вариации хитиназы, ответственной за цикл C/N, она была максимальной у ясеня и минимальной у вяза и осины; 69 % вариации фосфатазы, ответственной за цикл фосфора, с максимумом у вяза и клена и минимумом у ели и ясеня; 32 % вариации лейцинаминопептидазы (цикл N) с максимумом у ели и минимумом у осины и 26 % вариации  $\beta$ -глюкозидазы (цикл C) с максимумом у ясеня. Минимум активности ЛАП в почве под осиной может быть связан с тем, что в древесине этого вида содержится достаточное количество азота и микроорганизмы почвы относительно обеспечены этим элементом. В почве под елью, наоборот, есть лимитирование азотом, и вероятно, для восполнения дефицита по нему микроорганизмы извлекают его в ходе разложения, обуславливая максимум активности ЛАП. Повышение энзимной активности почвы под валежом высоких стадий разложения было отмечено ранее [14, 17]. Однако, существенный вклад вида валежа в вариацию ферментативной активности почвы не был показан. Возможно, высокая ферментативная активность почвы, связанная с циклом того или иного биофильного элемента, может быть как при недостатке, так и при избытке этого элемента.

Наши результаты – увеличение на ветровале химической активности суглинистых почв и микробиологической активности песчаных почв – подтвердили результаты, полученные другими авторами под лежащими стволами деревьев [14–19]. Однако, требуется проведение дополнительных исследований для уточнения полученных результатов.

#### 4. Заключение

Наше исследование показало, что на суглинках многие показатели активности и богатства почвы максимальны на участке массового ветровала, но не под лежащими стволами, а рядом с ними; в целом на массовом ветровале на суглинках происходит существенное увеличение емкости катионного обмена и снижение кислотности почвы. На песках обогащение почвы на массовом ветровале проявляется в уменьшении отношения C/N и повышении микробиологической активности почв – увеличении содержания микробной биомассы и скорости базального дыхания; также наблюдается

более сильная зависимость почвенных характеристик от вида упавшего дерева; свойства почвенных проб, взятых непосредственно под валежом и рядом с валежом, мало различаются.

## 5. Благодарности

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект № 20-04-00733а) в рамках государственных заданий ИМПБ РАН – филиала ИПМ им. М.В. Келдыша РАН, ИФХиБПП РАН – обособленного подразделения ПНЦБИ РАН и ЦЭПЛ РАН.

## 6. Список литературы

1. Magnússon R.I., Tietema A., Cornelissen J.H.C., Hefting M.M., Kalbitz K. Tamm Review: Sequestration of carbon from coarse woody debris in forest soils. *For. Ecol. Manag.* 2016. V. 377. P. 1–15.
2. Thom D., Seidl R. Natural disturbance impacts on ecosystem services and biodiversity in temperate and boreal forests. *Biol. Rev.* 2016. V. 91. P. 760–781.
3. Löf M., Brunet J., Hickler T., Birkedal M., Jensen A. Restoring broadleaved forests in southern Sweden as climate changes. In: *A goal-oriented approach to forest landscape restoration*. World Forests 16. Eds. Stanturf J. et al. P. 373–391.
4. *World Reference Base for Soil Resources*. World Soil Resource Reports No. 103. FAO, Rome. 2006.
5. Бобровский М.В., Стаменов М.Н. Катастрофический ветровал 2006 года на территории заповедника «Калужские засеки». *Лесоведение*. 2020. № 6. С. 523–536.
6. *Теория и практика химического анализа почв*. Под ред. Л.А. Воробьевой. М.: ГЕОС, 2006.
7. Anderson J.P.E., Domsch K.H. A physiological method for the quantitative measurement of microbial biomass in soils. *Soil Biol. Biochem.* 1978. V. 10. P. 215–221.
8. Ananyeva N.D., Susyan E.A., Chernova O.V., Wirth S. Microbial respiration activities of soils from different climatic regions of European Russia. *Eur. J. Soil Biol.* 2008. V. 44. P. 147–157.
9. Ivashchenko K., Ananyeva N., Vasenev V., Sushko S., Seleznyova A., Kudryarov V. Microbial C-availability and organic matter decomposition in urban soils of megapolis depend on functional zoning. *Soil Environ.* 2019. V. 38. No. 1. P. 31–41.
10. Marx M., Kandele, E., Wood M., Wermbter N., Jarvis S. Exploring the enzymatic landscape: distribution and kinetics of hydrolytic enzymes in soil particle-size fractions. *Soil Biol. Biochem.* 2005. V. 37. No. 1. P. 35–48.
11. Campbell C.D., Chapman S.J., Cameron C.M., Davidson M., Potts J.M. A rapid microtiter plate method to measure carbon dioxide evolved from carbon substrate amendments so as to determine the physiological profiles of soil microbial communities by using whole soil. *Appl. Environ. Microbiol.* 2003. V. 69. P. 3593–3599.
12. Moscatelli M.C., Secondi L., Marabottini R., Papp R., Stazi S.R., Mania E., Marinari S. Assessment of soil microbial functional diversity: land use and soil properties affect CLPP-MicroResp and enzymes responses. *Pedobiologia (Jena)*. 2018. V. 66. P. 36–42.
13. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing. *R Development Core Team*. Vienna, Austria, 2021.
14. Błońska E., Kacprzyk M., Spólnik A. Effect of deadwood of different tree species in various stages of decomposition on biochemical soil properties and carbon storage. *Ecol. Res.* 2017. V. 32. P. 193–203.
15. Błońska E., Lasota J., Piaszczyk W. Dissolved carbon and nitrogen release from deadwood of different tree species in various stages of decomposition. *Soil Sci. Plant Nutr.* 2019. V. 65. No. 1. P. 100–107.
16. Yuan J., Hou L., Wei X., Shang Z., Cheng F., Zhang S. Decay and nutrient dynamics of coarse woody debris in the Qinling Mountains, China. *PLoS ONE*. 2017. V. 12. No. 4. e0175203.
17. Piaszczyk W., Błońska E., Lasota J. Soil biochemical properties and stabilisation of soil organic matter in relation to deadwood of different species. *FEMS Microbiol.* 2019. V. 95. No. 3.
18. Minnich C., Peršoh D., Poll C., Borken W. Changes in chemical and microbial soil parameters following 8 years of deadwood decay: an experiment with logs of 13 tree species in 30 forests. *Ecosyst.* 2021. V. 24. P. 955–967.
19. Šamonil P., Daněk P., Baldrian P., Tláškal V., Tejnecký V., Drábek O. Convergence, divergence or chaos? Consequences of tree trunk decay for pedogenesis and the soil microbiome in a temperate natural forest. *Geoderma*. V. 376. Article No. 114499.