

ПРОСТРАНСТВЕННОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ СОДЕРЖАНИЯ И ЗАПАСОВ УГЛЕРОДА
В ПОЧВАХ ЛЕСНЫХ БИОГЕОЦЕНОЗОВ ПОД ВЛИЯНИЕМ ФИТОГЕННОГО
ПОЛЯ ДЕРЕВЬЕВ

Т.Л. Шешнищан

ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени
Г.Ф. Морозова», г. Воронеж, Россия

Аннотация. В условиях глобального изменения климата лесные экосистемы рассматриваются как одни из наиболее эффективных природных резервуаров углерода, способствующих снижению концентрации парниковых газов в атмосфере. Важную роль в углеродном балансе играет почвенный компонент лесных биогеоценозов, содержащий значительные запасы органического углерода. Однако пространственное распределение углерода в почвах лесов носит мозаичный характер, что связано с влиянием древесных пород, структуры насаждений и особенностей фитогенного поля. Настоящее исследование направлено на анализ пространственного варьирования содержания и запасов углерода в верхнем минеральном горизонте почв различных лесных фитоценозов в лесостепной зоне Воронежской области. Исследования проведены в контрастных по составу и структуре насаждениях – сосняке травяном с примесью дуба и дубняке осоко-снытьевом. Результаты показали, что максимальные запасы углерода наблюдаются в приствольных зонах, где формируются наиболее благоприятные условия для накопления органического вещества за счёт повышенной биологической активности и отложения подстилки. В межкроновых пространствах влияние древесных пород ослабевает, что приводит к снижению содержания углерода в почве. Однако в сомкнутых насаждениях эффект радиально-концентрической дифференциации менее выражен, что обусловлено перекрытием фитогенных полей деревьев. Полученные данные подтверждают важность учета видового состава и структуры лесных сообществ при оценке их углерододепонирующего потенциала.

Ключевые слова: лесные экосистемы, запасы углерода, фитогенное поле, мозаичность лесных биогеоценозов.

SPATIAL DISTRIBUTION OF CARBON CONTENT AND STOCKS IN FOREST
BIOGEOCENOSES UNDER THE INFLUENCE OF TREE PHYTOGENIC AREA

T.L. Sheshnitsan

*Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov,
Voronezh, Russia*

Abstract. In the context of global climate change, forest ecosystems are considered one of the most effective natural carbon reservoirs, contributing to the reduction of greenhouse gas concentrations in the atmosphere. The soil component of forest biogeocenoses plays a crucial role in the carbon balance, as it contains significant stocks of organic carbon. However, the spatial distribution of carbon in forest soils exhibits a mosaic pattern, influenced by tree species, stand structure, and the characteristics of the phytogenic field. This study aims to analyze the spatial variability of carbon content and stocks in the upper mineral horizon of soils in different forest phytocenoses within the forest-steppe zone of the Voronezh region. The research was conducted in two contrasting tree stands: *Pino-quercetumherbosum* and *Querceto-acero-tilietumcaricoso-aegopodiosum*. The results revealed that the highest carbon stocks are observed in tree trunk zones, where the most favorable conditions for organic matter accumulation are created due to increased biological activity and litter deposition. In intercrown areas, the influence of tree species weakens, leading to a decrease in soil carbon content. However, in closed-canopy stands, the effect of radial-concentric differentiation is less pronounced due to the overlapping phytogenic areas of trees. The obtained data highlight the importance of considering species composition and forest stand structure when assessing their carbon sequestration potential.

Keywords: forest ecosystems, carbon stocks, phytogenic area, mosaic pattern of forest biogeocenoses.

Введение

Глобальное потепление – экологическая проблема, решение которой, требует от мирового сообщества ученых найти регулирующие механизмы способные снизить содержание углекислого газа в атмосфере. С периода начала индустриальной эпохи концентрация углекислого газа в атмосфере увеличилась примерно с 278 ppm [8] до $419,3 \pm 0,1$ ppm к 2023 году [14]. Необходимо отметить, что, на долю глобальных лесных экосистем приходится около 90 % годового потока углерода между атмосферой и наземными экосистемами [4]. В целях смягчения последствий изменения глобального климата в последние несколько десятилетий рассматривается одна из возможных стратегий сокращения выбросов парниковых газов – использование лесных экосистем в качестве резервуаров углерода. Важным элементом глобального углеродного бюджета являются лесные почвы, так как содержат в 3 раза больше углерода, чем растительный компонент биосферы [13].

Исследования в различных климатических зонах подтвердили, что тип фитоценоза, является основным фактором, определяющим динамику углерода в почве [6, 7]. Однако, единого мнения относительно воздействия древесных пород на запасы органического углерода в верхнем минеральном слое почвы нет [3, 19]. Некоторые исследователи утверждают, что на накопление углерода в минеральной почве больше влияют тип почвы или климат [21], в то время как ранжирование древесных пород по содержанию углерода в почве противоположно для лесной подстилки [5, 19–21].

Многолетняя история экологических экспериментов и теорий подтверждает идею о том, что функции и услуги экосистем тесно связаны с биоразнообразием [16]. В частности, многочисленное количество исследований показало, что увеличение видового разнообразия положительно влияет на продуктивность [18], секвестрацию углерода в почве [10, 15], pH,

насыщенность основаниями [9], общее количество азота, доступность фосфора, жизнестойкость и устойчивость к экстремальным климатическим условиям [12]. Развитие углерододепонирующих смешанных насаждений может стать возможной практикой углеродного лесовосстановления за счет адаптации лесов к изменению климата и одновременного повышения производительности и связывания углерода [2].

Лесной биогеоценоз представляет собой динамичную систему, подверженную циклическим изменениям во времени и пространстве, поэтому оценка пространственного распределения углерода является необходимой для прогнозирования потенциальной емкости почвенного углерода в условиях глобального изменения климата. Сложность этой оценки обусловлена мозаичностью строения лесного биогеоценоза и значительным варьированием свойств почв под влиянием отдельных деревьев и древесных пород. Чем мощнее фитогенное поле, тем сильнее проявляется индивидуальное воздействие деревьев на почвенный покров и биогеоценозические связи в целом. Важно подчеркнуть необходимость подробного изучения влияния отдельных видов древесных пород на запасы углерода с целью выявления наиболее эффективных пород для секвестрации углерода.

Целью исследования являлось изучение влияния пространственного распределения содержания и запасов углерода в верхнем минеральном слое почв в зависимости от зоны фитогенного поля в разных типах лесных фитоценозов лесостепной зоны Воронежской области.

Материалы и методы исследования

Территория исследования расположена в южной части Окско-Донской равнины, между Донско-Воронежским и Воронежско-Усманским водоразделами. На правобережье расположены возвышенные дубовые леса, произрастающие на склонах и частично на водоразделе Воронеж-Дон, с высотами от 155 до 165 м над уровнем моря. Хвойные леса распространены на левобережных террасах на высоте 103-122 м над уровнем моря. Климат умеренно-континентальный, с выраженными сезонными изменениями температуры и осадков. Среднегодовая температура составляет +7,6°C, средняя температура июля +21,3°C, января -6,0°C. Среднегодовое количество осадков составляет 586 мм.

Для оценки свойств почв и характеристик лесных насаждений были заложены пробные площади (ПП) размером 50×50 м (0,25 га) в спелых и перестойных древостоях. Одна из таких площадей (ПП № 3-1) расположена в квартале № 60 (выдел 11) Левобережного участкового лесничества, а другая (ПП № 6-1) – в квартале № 47 (выдел 3) Правобережного участкового лесничества Пригородного лесничества Воронежской области. При отборе проб почв в области функциональных зон фитогенного поля (деревя: приствольной, подкроновой и межкroновой, использовался метод трансект (предусматривая 5-6 пунктов отбора проб). Содержание общего углерода в почвенных образцах определяли с помощью элементного анализатора ECS 8024 NC SoilSpecial (N.C. TECHNOLOGIES SRL, Италия). Статистическую обработку данных проводили с помощью программного пакета STATISTICA 12.5 (StatSoft Inc., 2014).

Результаты исследования и их обсуждение.

В ходе исследования были получены данные, характеризующие пространственное распределение углерода в верхнем минеральном слое почв (слой 0-10 см) в зависимости от функциональной зоны фитогенных полей разных древесных пород в двух контрастных типах леса: сосняк травяной с дубом (Ссрт) и дубняк осоко-снытьевый (Досн) (рис.).

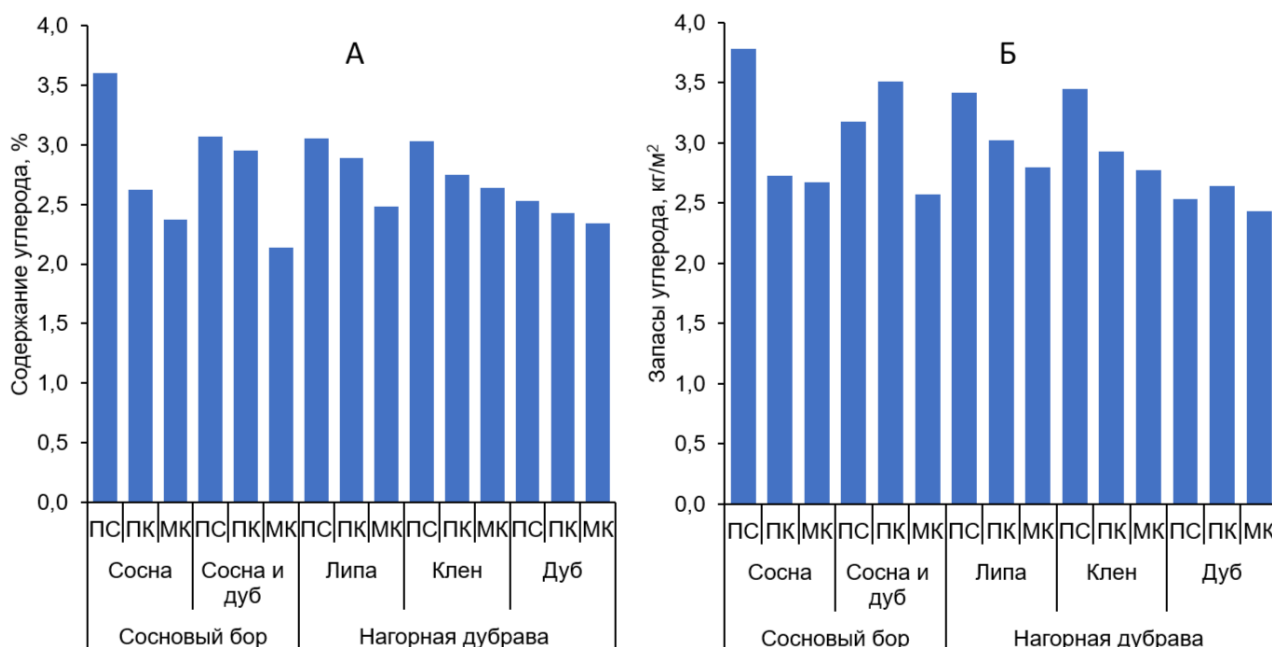


Рисунок – Содержание (А) и запасы (Б) углерода в лесных почвах (слой 0-10 см) в разных микрозонах тессеры в хвойных и лиственных лесах. Микрозоны тессеры: ПС – приствольный участок, ПК – подкрановое пространство, МК – межкрановое пространство.

Так, в сосняке травяном с дубом Ссрт высокое содержание углерода ($3,60 \pm 1,66\%$), регистрируется в приствольной зоне сосны, при этом коэффициент вариации изменяется в широких пределах от 2,4 до 5,51%. Данное повышение, связано прежде всего с фракционным составом подстилки в приствольном возвышении, большую часть которой составляют труха и кора. По мере удаления от ствола, в подкрановых участках содержание углерода уменьшается до $2,62 \pm 0,31\%$, а также изменяется характер подстилки, соотношение веток и хвои увеличивается. Межкрановое пространство характеризуется низким содержанием углерода ($2,37 \pm 0,45\%$), с узким варьированием от 1,89 до 2,78%. Пространственное распределение содержания углерода, как и мощность подстилки уменьшается в ряду приствольная – подкрановая – межкрановая зона, что соответствует снижению напряженности фитогенного поля в радиальном направлении. Запасы почвенного углерода, также убывают от внутренней к внешней части фитогенного поля достигая максимальных значений в приствольном участке $3,78 \text{ кгС/м}^2$, а минимальных в межкрановых пространствах $2,67 \text{ кгС/м}^2$.

Исследуя высокопродуктивное насаждение сосны обыкновенной с примесью дуба черешчатого, мы рассмотрели влияние сопряженных фитогенных полей на распределение содержания углерода в почве, где главным средообразователем является сосна. Анализ

данных показал, увеличение запаса углерода не только в приствольной, но и в подкроновой зоне биогеоценотического поля, может быть обусловлено примесью опада лиственных пород, который может оказывать аддитивное влияние на разложение хвойной подстилки [11].

Наши расчеты показали, что в типе лесорастительных условиях Д₂ в дубняке осоко-снытьевом (Досн) содержание и запасы углерода в трех функциональных зонах биогеоценотического поля дуба черешчатого были близки средним значениям. Зависимость содержания и запаса углерода от занимаемой зоны в пределах влияния эдификатора, часто не прослеживается, так как подвержено воздействию различных свойств почвенного покрова (гранулометрического состава, pH, микрорельефа и т.д.) [1]. Распределение запасов углерода органических соединений в пределах фитогенных зон липы и клена в направлении от стволов к границам проекции крон уменьшается, что согласуется с аналогичным распределением для сосны обыкновенной.

Заключение

Пространственное распределение содержания и запасов углерода в верхнем минеральном слое почв лесных экосистем определяется напряжённостью фитогенного поля эдификаторов и типом древостоя. Согласно полученным данным, в целом отмечается тенденция увеличения содержания и в ряде случаев запасов углерода в приствольных зонах, где влияние деревьев наиболее выражено и создаются благоприятные условия для накопления органического вещества. Напротив, ослабление фитогенного поля в межкроновых зонах сопровождается заметным снижением запасов углерода, что отражает радиально-концентрическую дифференциацию запасов углерода в пределах фитогенного поля дерева. Однако взаимное перекрывание функциональных полей деревьев и ярусов лесного биогеоценоза в сомкнутых насаждениях ограничивает выраженность подобной дифференциации, что характерно для изученных лиственных лесов.

Работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки РФ № 1023013000012-7 «Биогеохимический мониторинг цикла углерода в природных и антропогенных экосистемах Воронежской области в условиях глобального изменения климата (FZUR-2023-0001)»

Список литературы

1. Подвезенная М.А., Рыжова И.М. Зависимость вариабельности запасов углерода в почве от пространственной структуры растительного покрова лесных биогеоценозов // Вестник Московского университета. Серия 17: Почвоведение. – 2010. – № 4. – С. 3–9.
2. Augusto L., Boča A. Tree functional traits, forest biomass, and tree species diversity interact with site properties to drive forest soil carbon // Nature Communications. – 2022. – Vol. 13. – P. 1097.
3. Boča A., Van Miegroet H., Gruselle M.-C. Forest overstory effect on soil organic carbon storage: a meta-analysis // Soil Science Society of America Journal. – 2014. – Vol. 78. – P. S35–S47.

4. Dixon R.K., Brown S., Houghton R.A., Solomon A.M., Trexler M.C., Wisniewski J. Carbon pools and flux of global forest ecosystems // *Science*. – 1994. – Vol. 263. – P. 185–190.
5. Fleck S., Eickenscheidt N., Ahrends B., et al. Nitrogen status and dynamics in German forest soils // Wellbrock N., Bolte A. (Eds.), *Status and Dynamics of Forests in Germany*. – Berlin: Springer, 2019. – P. 123–166.
6. Framstad E., Wit H., Mäkipää R., Larjavaara M., Vesterdal L., Karlton E. Biodiversity, carbon storage and dynamics of old northern forests. – Copenhagen: Nordic Council of Ministers, 2013.
7. Gleixner G. Soil organic matter dynamics: A biological perspective derived from the use of compound-specific isotopes studies // *Ecological Research*. – 2013. – Vol. 28. – P. 683–695.
8. Gulev S.K., Thorne P.W., Ahn J., et al. Changing State of the Climate System // *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. – Cambridge: Cambridge University Press, 2021. – P. 287–422.
9. Guckland A., Jacob M., Flessa H., Thomas F.M., Leuschner C. Acidity, nutrient stocks, and organic-matter content in soils of a temperate deciduous forest with different abundance of European beech (*Fagus sylvatica* L.) // *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*. – 2009. – Vol. 172. – P. 500–511.
10. Hao Z., Quan Z., Han Y., et al. Soil mineralized carbon drives more carbon stock in coniferous-broadleaf mixed plantations compared to pure plantations // *PeerJ*. – 2022. – Vol. 10. – e13542.
11. Hattenschwiler S., Tiunov A.V., Scheu S. Biodiversity and litter decomposition in terrestrial ecosystems // *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*. – 2005. – Vol. 36. – P. 191–218.
12. Isbell F., Craven D., Connolly J., et al. Biodiversity increases the resistance of ecosystem productivity to climate extremes // *Nature*. – 2015. – Vol. 526. – P. 574–577.
13. Lal R. Soil carbon sequestration impacts on global change and food security // *Science*. – 2004. – Vol. 304. – P. 1623–1627.
14. Lan X., Tans P., Thoning K.W. Trends in globally-averaged CO₂ determined from NOAA Global Monitoring Laboratory measurements, Version 2024-09 // National Oceanic and Atmospheric Administration, Global Monitoring Laboratory (NOAA/GML) [dataset], available at: <https://gml.noaa.gov/ccgg/trends/global.html> (accessed: 28 October 2024).
15. Li Y., Bruelheide H., Scholten T., et al. Early positive effects of tree species richness on soil organic carbon accumulation in a large-scale forest biodiversity experiment // *Journal of Plant Ecology*. – 2019. – Vol. 12(5). – P. 882–893.
16. Mace G.M., Norris K., Fitter A.H. Biodiversity and ecosystem services: a multilayered relationship // *Trends in Ecology & Evolution*. – 2012. – Vol. 27(1). – P. 19–26.
17. Marina GetinoÁlvarez, San Martín R., Pretzsch H., Pach M., Bravo F., Turrión M.B. Assessing soil C stock and C to N ratio of soil organic matter under mixed pine-beech forests at different scales // *European Journal of Forest Research*. – 2023. – Vol. 142. – P. 1081–1098.

18. Ouyang S., Xiang W., Wang X., et al. Effects of stand age, richness and density on productivity in subtropical forests in China // *Journal of Ecology*. – 2019. – Vol. 107. – P. 2266–2277.
19. Peng Y., Schmidt I.K., Zheng H., et al. Tree species effects on topsoil carbon stock and concentration are mediated by tree species type, mycorrhizal association, and N-fixing ability at the global scale // *Forest Ecology and Management*. – 2020. – Vol. 478. – Article 118510.
20. Steffens C., Beer C., Schelfhout S., et al. Do tree species affect decadal changes in soil organic carbon and total nitrogen stocks in Danish common garden experiments? // *European Journal of Soil Science*. – 2022. – Vol. 73(1). – e13206.
21. Vesterdal L., Clarke N., Sigurdsson B.D., Gundersen P. Do tree species influence soil carbon stocks in temperate and boreal forests? // *Forest Ecology and Management*. – 2013. – Vol. 309. – P. 4–18.

References

1. Podvezennaya M.A., Ryzhova I.M. Dependence of variability of carbon reserves in soil on the spatial structure of vegetation cover of forest biogeocenoses // *Bulletin of the Moscow University. Series 17: Soil Science*. – 2010. – No. 4. – pp. 3–9.
2. Augusto L., Bocha A. Functional features of trees, forest biomass and a variety of tree species interact with the properties of the site, increasing the carbon content in the forest soil // *Nature Communications*. – 2022. – Volume 13. – p. 1097.
3. Bocha A., Van Megroet H., Gruzel M.-S. The effect of excess forest on the accumulation of organic carbon in the soil: a meta-analysis // *Journal of the Soil Science Society of America*. – 2014. – Volume 78. – pp. 35–47.
4. Dixon R.K., Brown S., Houghton R.A., Solomon A.M., Trexler M.S., Wisniewski J. Carbon pools and flows of global forest ecosystems // *Science*. – 1994. – Volume 263. – pp. 185–190.
5. Fleck S., Eikenscheidt N., Arends B. and others. The state and dynamics of nitrogen content in German forest soils // Wellbrock N., Bolte A. (eds.), *The state and dynamics of forests in Germany*. Berlin: Springer, 2019. pp. 123–166.
6. Framstad E., With H., Myakipya R., Laryavaara M., Westerdal L., Karlton E. Biodiversity, carbon accumulation and dynamics of old-growth northern forests. Copenhagen: Nordic Council of Ministers, 2013.
7. Gleixner G. Dynamics of soil organic matter: a biological perspective based on the study of isotopically specific compounds // *Environmental research*. – 2013. – Volume 28. – pp. 683–695.
8. Gulev S.K., Thorn P.V., An J. and others. Changing the state of the climate system // *Climate change 2021: fundamentals of physical science. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge: Cambridge University Press, 2021. pp. 287–422.
9. Gackland A., Jacob M., Flessa H., Thomas F.M., Leuschner S. Acidity, nutrient reserves and organic matter content in soils of deciduous forests of the temperate zone with varying abundance of European beech (*Fagus sylvatica* L.) // *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*. – 2009. – Volume 172. – pp. 500–511.
10. Hao Z., Quan Z., Han Yu. and others. Mineralized carbon in the

- soil increases carbon reserves in mixed coniferous and broadleaf plantations compared to pure plantations // *PeerJ*. – 2022. – Volume 10. – e13542.
11. Hattenshwyler S., Tiunov A. V., Sheu S. Biodiversity and debris decomposition in terrestrial ecosystems // *Annual review of ecology, evolution and systematics*. – 2005. – Volume 36. – pp. 191-218.
 12. Isbell F., Craven D., Connolly J. and others . Biodiversity increases the resilience of ecosystem productivity to extreme climatic events // *Nature*. – 2015. – Volume 526. – pp. 574-577.
 13. Lal R. The influence of soil carbon uptake on global changes and food security // *Science*. – 2004. – Volume 304. – pp. 1623-1627.
 14. Lan H., Tans P., Tonia K. V. Trends in globally averaged CO₂ content determined based on measurements from the NOAA Global Monitoring Laboratory, version 2024-09 // National Oceanic and Atmospheric Administration, Global Monitoring Laboratory (NOAA/GML) [dataset], available at: <https://gml.noaa.gov/ccgg/trends/global.html> (date of request: October 28, 2024).
 15. Li Y., Brulheide H., Scholten T. et al. Early positive impact of tree species diversity on the accumulation of organic carbon in soil in a large-scale experiment to preserve forest biodiversity // *Journal of Plant Ecology*, 2019, vol. 12(5), pp. 882-893.
 16. Mace G. M., Norris K., Fitter A. H. Biodiversity and ecosystem services: a multilevel relationship // *Trends in ecology and evolution*. – 2012. – Volume 27(1). – pp. 19-26.
 17. Marina Getino Alvarez, San Martin R., Pretsch H., Patch M., Bravo F., Turrión M. B. Assessment of carbon reserves in soil and the ratio of C to N in soil organic matter in mixed pine-beech forests on various scales // *European Journal of Forest Research*. – 2023. – Volume 142. – pp. 1081-1098.
 18. Ouyang S., Xiang W., Wang H. and others . The influence of age, richness, and density of stand on the productivity of China's subtropical forests // *Ecological Journal*, 2019, volume 107, pp. 2266-2277.
 19. Peng Y., Schmidt I. K., Zheng H. and others . The influence of tree species on carbon accumulation in the upper soil layer and its concentration is determined by the type of tree species, mycorrhizal and the ability to fix nitrogen on a global scale // *Ecology and Forest Management*. – 2020. – Volume 478. – Article 118510.
 20. Steffens S., Beer S., Shelfhout S. et al. Do tree species influence ten-year changes in soil organic carbon content and total nitrogen content in Danish gardening experiments? // *European Journal of Soil Science*. – 2022. – Volume 73(1). – e13206.
 21. Westerdahl L., Clark N., Sigurdsson B. D., Gundersen P. Do tree species affect soil carbon reserve in temperate and boreal forests? // *Forest ecology and management*. – 2013. – Volume 309. – pp. 4-18.