



Краткое сообщение

УДК 630*5/6

DOI: 10.37482/0536-1036-2025-5-180-186

Возрастная реверсия рангового распределения фракций надземной биомассы рода *Salix* L.

*А.А. Парамонов*¹, канд. с.-х. наук, науч. сотр.; ResearcherID: [ABH-7242-2020](https://orcid.org/0000-0002-0961-221X),
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0961-221X>

А.А. Карабан^{1,2}, лаборант-исследователь, аспирант; ResearcherID: [ABD-9818-2021](https://orcid.org/0000-0002-2934-0303),
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2934-0303>

В.А. Усольцев^{3,4}✉, д-р с.-х. наук, проф.; ResearcherID: [M-8253-2018](https://orcid.org/0000-0003-4587-8952),
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4587-8952>

И.В. Цветков^{1,2}, канд. с.-х. наук; ResearcherID: [AAV-6441-2021](https://orcid.org/0000-0002-1559-3254),
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1559-3254>

С.В. Третьяков^{1,2}, д-р с.-х. наук, проф.; ResearcherID: [AAE-3861-2021](https://orcid.org/0000-0001-5982-3114),
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5982-3114>

*И.С. Цепордей*⁵, канд. с.-х. наук, ст. науч. сотр.; ResearcherID: [AAC-5377-2020](https://orcid.org/0000-0002-4747-5017),
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4747-5017>

¹Северный научно-исследовательский институт лесного хозяйства, ул. Никитова, д. 13, г. Архангельск, Россия, 163062; vagner93@inbox.ru, karaban@sevniilh-arh.ru, i.tsvetkov@narfu.ru, s.v.tretyakov@narfu.ru

²Северный (Арктический) федеральный университет им. М.В. Ломоносова, наб. Северной Двины, д. 17, г. Архангельск, Россия, 163002; karaban@sevniilh-arh.ru, i.tsvetkov@narfu.ru, s.v.tretyakov@narfu.ru

³Уральский государственный лесотехнический университет, ул. Сибирский тракт, д. 37, г. Екатеринбург, Россия, 620100; Usoltsev50@mail.ru✉

⁴Уральский государственный экономический университет, ул. 8 марта/Народной воли, д. 62/45, г. Екатеринбург, Россия, 620144; Usoltsev50@mail.ru✉

⁵Ботанический сад УрО РАН, ул. 8 марта, д. 202а, г. Екатеринбург, Россия, 620144; ivan.tsepordey@yandex.ru

Поступила в редакцию 17.04.24 / Одобрена после рецензирования 20.06.24 / Принята к печати 25.06.24

Аннотация. Органы растения выполняют множество различных функций. Листья обеспечивают поступление ассимилятов, ствол и ветви – фотосинтез, транспортировку воды и питательных веществ, а корни подают воду и элементы питания и способствуют физической устойчивости. Для достижения оптимальной работы на уровне растения в целом между этими функциями есть некая пропорциональность, которая опосредуется количеством биомассы в органах растения. Соотношение биомассы одного органа с биомассой другого известно как «распределение биомасс», которое является совокупным результатом динамического распределения ассимилятов с течением времени. Некоторыми реализациями распределения фракций биомассы растения являются негауссовские распределения, в частности, распределение Ципфа–Парето. На примере

6 хвойных родов Евразии было установлено, что регрессионный коэффициент уравнения Ципфа–Парето не является постоянным на протяжении всего периода роста растения, а в некотором установленном возрасте меняет знак. Цель настоящего исследования – сформировать базу данных о биомассе рода *Salix* L. и установить возраст реверсии фракций надземной биомассы. Использованы авторские и привлеченные исходные материалы в количестве 94 измерений надземной биомассы ив в возрасте от 1 до 79 лет на территории европейской части России. Исходные данные биомассы фракций ранжированы в убывающей последовательности: ствол, ветви, листья (соответственно i равно 1, 2 и 3) и аппроксимированы моделью в двойных логарифмических координатах, включающей в качестве независимых переменных не только ранг i , но также возраст дерева, его высоту и комбинированную переменную в виде произведения возраста на ранг i . Последняя оказалась статистически значимой на уровне вероятности $P < 0,0001$, а ее отрицательное значение отражает, что в некотором возрасте последовательность фракций надземной биомассы в убывающем порядке: листья, ветви, ствол – меняется на противоположную убывающую последовательность: ствол, ветви, листья – и возраст реверса составляет около 2 лет. Установленный факт возрастного реверса фракций надземной биомассы ивы и определение возраста дерева, в котором происходит реверс, являются вкладом в развитие теории распределения ассимилятов в растениях.

Ключевые слова: *Salix* L., фракции надземной биомассы растения, модель Ципфа–Парето, регрессионный анализ, возрастная реверс рангового распределения фракций

Благодарности: Публикация подготовлена по результатам НИР, выполненной в рамках госзадания ФБУ «СевНИИЛХ» на проведение прикладных научных исследований в сфере деятельности Федерального агентства лесного хозяйства (регистрационный номер темы – 123022800113-9).

Для цитирования: Парамонов А.А., Карабан А.А., Усольцев В.А., Цветков И.В., Третьяков С.В., Цепордей И.С. Возрастная реверсия рангового распределения фракций надземной биомассы рода *Salix* L. // Изв. вузов. Лесн. журн. 2025. № 5. С. 180–186. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2025-5-180-186>

Brief report

Age Reversion of the Rank Distribution of Aboveground Biomass Fractions in the Genus *Salix* L.

Andrey A. Paramonov¹, Candidate of Agriculture, Research Scientist;

ResearcherID: [ABH-7242-2020](https://orcid.org/0000-0002-0961-221X), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0961-221X>

Aleksey A. Karaban^{1,2}, Laboratory Assistant–Researcher, Postgraduate;

ResearcherID: [ABD-9818-2021](https://orcid.org/0000-0002-2934-0303), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2934-0303>

Vladimir A. Usoltsev^{3,4}, Doctor of Agriculture, Prof.; ResearcherID: [M-8253-2018](https://orcid.org/0000-0003-4587-8952),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4587-8952>

Ilya V. Tsvetkov^{1,2}, Candidate of Agriculture; ResearcherID: [AAU-6441-2021](https://orcid.org/0000-0002-1559-3254),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1559-3254>

Sergey V. Tretyakov^{1,2}, Doctor of Agriculture, Prof.; ResearcherID: [AAE-3861-2021](https://orcid.org/0000-0001-5982-3114),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5982-3114>

Ivan S. Tsepordey⁵, Candidate of Agriculture, Senior Research Scientist;

ResearcherID: [AAC-5377-2020](https://orcid.org/0000-0002-4747-5017), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4747-5017>

¹Northern Research Institute of Forestry, ul. Nikitova, 13, Arkhangelsk, 163062, Russian Federation; vagner93@inbox.ru, karaban@sevniilh-arh.ru, i.tsvetkov@narfu.ru, s.v.tretyakov@narfu.ru

²Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, Nabereznaya Severnoy Dviny, 17, Arkhangel'sk, 163002, Russian Federation; karaban@sevniilh-arh.ru, i.tsvetkov@narfu.ru, s.v.tretyakov@narfu.ru

³Ural State Forest Engineering University, Sibirskij Trakt, 37, Yekaterinburg, 620100, Russian Federation; Usoltsev50@mail.ru✉

⁴Ural State University of Economics, ul. 8 Marta/Narodnoj Voli, 62/45, Yekaterinburg, 620144, Russian Federation; Usoltsev50@mail.ru✉

⁵Botanical Garden of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, ul. 8 Marta, 202a, Yekaterinburg, 620144, Russian Federation; ivan.tsepordey@yandex.ru

Received on April 17, 2024 / Approved after reviewing on June 20, 2024 / Accepted on June 25, 2024

Abstract. Plant organs perform many different functions. The leaves provide the supply of assimilates, the stem and branches provide photosynthesis, transportation of water and nutrients, and the roots supply water and nutrients and contribute to physical stability. To achieve optimal performance at the plant level as a whole, there is a certain proportionality between these functions, which is mediated by the amount of biomass in the plant organs. The ratio of the biomass of one organ to that of another is known as the “biomass partitioning”, which is the cumulative result of the dynamic distribution of assimilates over time. Some implementations of the distribution of plant biomass fractions are non-Gaussian distributions, in particular, the Zipf-Pareto distribution. Using 6 coniferous genera of Eurasia as an example, it has been established that the regression coefficient of the Zipf-Pareto equation is not constant throughout the entire period of plant growth, but changes its sign at a certain age. The aim of this study has been to create a database on the biomass of the genus *Salix* L. and to determine the age of reversion of aboveground biomass fractions. The authors' and attracted source materials have been used in the amount of 94 measurements of the aboveground biomass of willows aged from 1 to 79 years in the territory of the European part of Russia. The initial data on the biomass fractions have been ranked in descending order: stem, branches, foliage (respectively, i is equal to 1, 2 and 3) and approximated by a model in double logarithmic coordinates, including as independent variables not only the rank i , but also the age of the tree, its height and a combined variable in the form of the product of age by rank i . The latter has turned out to be statistically significant at the probability level of $P < 0.0001$, and its negative value reflects that at a certain age the sequence of fractions of aboveground biomass in descending order: leaves, branches, stem – changes to the opposite descending sequence: stem, branches, leaves – and the age of the reverse is about 2 years. The established fact of age-related reversal of fractions of the aboveground willow biomass and the determination of the age of the tree in which the reversal occurs are a contribution to the development of the theory of assimilate distribution in plants.

Keywords: *Salix* L., fractions of the aboveground plant biomass, the Zipf-Pareto model, regression analysis, age reversal of the rank distribution of fractions

Acknowledgements: The publication was prepared based on the results of research carried out within the framework of the state assignment of the Federal Budgetary Institution “Northern Research Institute of Forestry” for applied scientific research in the field of activity of the Federal Forestry Agency (topic registration no. 123022800113-9).

For citation: Paramonov A.A., Karaban A.A., Usoltsev V.A., Tsvetkov I.V., Tretyakov S.V., Tsepordey I.S. Age Reversion of the Rank Distribution of Aboveground Biomass Fractions in the Genus *Salix* L. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2025, no. 5, pp. 180–186. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2025-5-180-186>

Введение

Органы растения выполняют различные функции. Листья отвечают за поступление ассимилятов, стволы и ветви – за фотосинтез и транспортировку воды и питательных веществ, а корни подают воду и элементы питания, обеспечивают физическую устойчивость [12, 14, 16]. Для достижения оптимального функционирования на уровне растения в целом, между этими функциями должна быть определенная пропорциональность, поскольку все они необходимы для роста и размножения [13, 17–20]. Эта пропорциональность частично зависит от количества биомассы в органах растения. Для описания соотношений биомассы одного органа с биомассой другого или растения в целом применяется термин «распределение биомасс». Этот термин не имеет прямого отношения к динамическому распределению вновь образовавшихся ассимилятов по различным органам растения, однако фактическое распределение наличной биомассы между органами растения в данный момент времени является совокупным результатом динамического распределения ассимилятов на протяжении некоторого периода или всего жизненного цикла растения [8, 10, 11, 15].

Некоторыми реализациями распределения фракций биомассы растений являются негауссовские распределения, в частности, распределение Ципфа–Парето [4]:

$$\ln P_j = a - b \ln i,$$

где P_j – фитомасса j -й фракции (ствол, корни, ветви, листва или хвоя), кг; i – ранг фракции, т. е. ее порядковый номер в убывающем ряду: ствол, корни, ветви, листва или хвоя; a – свободный член; b – коэффициент конкуренции за ресурс. Названное распределение было реализовано в нескольких приложениях [1, 4, 5, 9]. А.С. Комаров с соавт. [1] обратили внимание на то, что в начальный период роста растение характеризуется реверсным распределением биомасс в убывающем порядке: листва, корни, ветви, ствол. Они отметили, что установление возраста, при котором происходит реверс названных распределений, является приоритетным направлением дальнейших исследований в плане развития теории распределения ассимилятов в растениях. Недавно подобное исследование было выполнено на примере 6 хвойных родов Евразии, и установлен возраст реверса их биомасс в диапазоне от 2 до 7 лет [6]. Для лиственных видов таких научных работ не проводилось.

Цель – сформировать базу данных о биомассе рода *Salix* L. и установить возраст реверсии биомасс надземных фракций.

Объекты и методы исследования

Исходные материалы содержали 94 измерения надземной биомассы ив. Из них данные, полученные авторами, включают 17 измерений побегов на черенках в возрасте от 1 до 2 лет (Архангельская область), 3 экземпляра подроста в возрасте от 5 до 13 лет (Урал) и 52 дерева из естественных древостоев в возрасте от 15 до 70 лет (Архангельская область) [2]. Кроме того, привлечены данные В.В. Смирнова [3] для Новгородской и Вологодской областей в количестве 22 деревьев в возрасте от 13 до 79 лет. Исследованы виды *Salix myrsinifolia* Salisb., *S. gmelinii* Pall., *S. carpea* L., *S. borealis* Fries. Диапазоны исходных значений таксационных показателей и надземной биомассы ивы были следующие:

ми: возраст – 1...79 лет; высота – 0,24...17,7 м; биомасса листьев, ветвей, ствола соответственно – 0,00058...4,4; 0,00030...27,8; 0,00041...74,6 кг.

Исходные данные ранжированы в убывающей последовательности: ствол, ветви, листва (соответственно i равно 1, 2 и 3) – и обработаны методом многофакторного анализа согласно структуре рекурсивных моделей, апробированной ранее [6].

Результаты исследования и их обсуждение

Получена рекурсивная система 2 моделей:

$$\ln H = -1,3180 + 1,6755 \ln A - 0,1797 (\ln A)^2, \text{ adj}R^2 = 0,966, \text{ SE} = 0,196; \quad (1)$$

$$\ln P_j = -5,2340 + 2,2982 \ln H + 0,7922 \ln A + 0,2909 \ln i - 0,9319 \ln A \ln i, \\ \text{adj}R^2 = 0,932, \text{ SE} = 0,826, \quad (2)$$

где $\text{adj}R^2$ – коэффициент детерминации, скорректированный на количество переменных; SE – стандартная ошибка моделей.

Свободный член в (1) и (2) скорректирован на логарифмическую трансформацию [7]. В моделях (1) и (2) независимые переменные объясняют 93...97 % изменчивости зависимых переменных, и остаточная дисперсия в размере от 3 до 7 % приходится на совокупность неучтенных факторов (типы леса, густота древостоев, природная зональность и пр.).

Последовательным табулированием моделей (1) и (2) получены расчетные значения, по которым построена 3D-поверхность, представляющая зависимость фракции биомассы дерева от ее ранга и возраста дерева (рис. 1).

Из результатов табулирования моделей (1) и (2) взяты значения биомассы в узком диапазоне возраста, примерно соответствующем реверсу биомасс, и построена 3D-поверхность (рис. 2). Из графических данных следует, что реверс распределения фракций биомассы приходится на возраст около 2 лет.

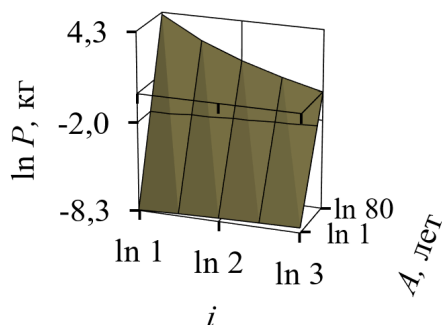


Рис. 1. Графическая интерпретация модели возрастного реверса связи биомассы фракций с ее рангом

Fig. 1. The graphical interpretation of the age reversal model of the correlation of biomass fractions with its rank

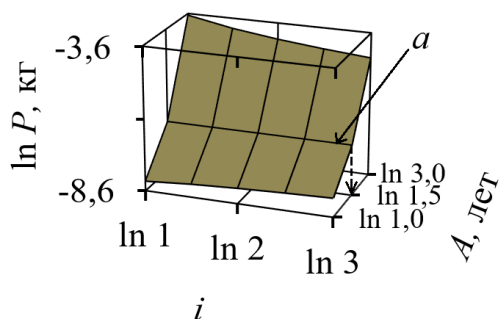


Рис. 2. Расчетная 3D-поверхность, показывающая, в каком возрасте достигается реверс биомасс фракций деревьев (a – линия, параллельная оси $(\ln i)$, соответствует возрасту (пунктирная стрелка) равенства фракций биомассы между собой)

Fig. 2. The calculated 3D-surface showing the age at which the reversal of biomass fractions of trees is achieved (a – a line parallel to the axis $(\ln i)$, corresponding to the age (dotted arrow) of equality of biomass fractions among themselves)

Заключение

Таким образом, на примере рода *Salix* L. показано, что уравнение Ципфа–Парето не работает на всем возрастном диапазоне деревьев, и спустя какое-то количество лет с начала роста его регрессионный коэффициент меняет знак. Этот возраст реверса биомасс фракций установлен и равен примерно 2 годам.

Наличие возрастного реверса фракций надземной биомассы ив и возраста дерева, в котором происходит реверс, можно рассматривать в качестве вклада в развитие теории распределения ассимилятов в растениях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Комаров А.С., Гинжул Л.К., Шанин В.Н., Быховец С.С., Бобкова К.С., Кузнецов М.А., Манов А.В., Осипов А.Ф. Особенности распределения биомассы бореальных видов деревьев по фракциям // Изв. РАН. Сер.: Биологич. 2017. № 6. С. 76–84.
Komarov A.S., Ginzbul L.K., Shanin V.N., Bykhovets S.S., Bobkova K.S., Kuznetsov M.A., Manov A.V., Osipov A.F. Pattern of Biomass Partitioning into Fractions of Boreal Trees. *Izvestiya RAN. Seriya: Biologicheskaya = Biology Bulletin*, 2017, vol. 44, pp. 626–633. <https://doi.org/10.1134/S1062359017060061>
2. Парамонов А.А., Усольцев В.А., Третьяков С.В., Коптев С.В., Карабан А.А., Цветков И.В., Давыдов А.В., Цепордей И.С. Биомасса деревьев ивы и ее аллометрические модели в условиях Архангельской области // Леса России и хоз-во в них. 2022. № 4. С. 10–19.
Paramonov A.A., Usoltsev V.A., Tretyakov S.V., Koptev S.V., Karaban A.A., Tsvetkov I.V., Davydov A.V., Tsepordey I.S. Willow Tree Biomass and its Allometric Models in the Conditions of the Arkhangelsk Region. *Lesa Rossii i khozyajstvo v nikh = Forests of Russia and Economy in Them*, 2022, no. 4, pp. 10–19. (In Russ.).
<https://doi.org/10.51318/FRET.2022.27.41.002>
3. Смирнов В.В. Органическая масса в некоторых лесных фитоценозах европейской части СССР. М.: Наука, 1971. 362 с.
Smirnov V.V. *Organic Matter in Some Forest Phytocenoses of the European Part of the USSR*. Moscow, Nauka Publ., 1971. 362 p. (In Russ.).
4. Соловьев В.А., Нян Ч.Т.Т., Шорохова Е.В. Распределение углерода по фракциям фитомассы различных древостоев и лесного массива // Изв. С.-Петерб. лесотехн. акад. 2012. Вып. 198. С. 33–40.
Soloviev V.A., Nyan Ch.T.T., Shorokhova E.V. Carbon Distribution by Phytomass Fractions of Various Stands and Woodlands. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj lesotekhnicheskoy akademii*, 2012, iss. 198, pp. 33–40. (In Russ.).
5. Суховольский В.Г. Распределение фитомассы деревьев по фракциям и оценка биопродуктивности деревьев и насаждений // Лесоведение. 1996. № 1. С. 30–40.
Sukhovol'skij V.G. Distribution of Tree Phytomass by Fractions and Assessment of Bioproductivity of Trees and Plantings. *Lesovedenie = Russian Journal of Forest Science*, 1996, no. 1, pp. 30–40. (In Russ.).
6. Усольцев В.А., Цепордей И.С. Ранговое распределение фракций фитомассы деревьев в новом освещении // Сиб. лесн. журн. 2023. № 4. С. 41–51.
Usoltsev V.A., Tsepordey I.S. Rank Distribution of a Tree Phytomass Fractions in New Interpretation. *Sibirskij lesnoj zhurnal = Siberian Journal of Forest Science*, 2023, no. 4, pp. 41–51. (In Russ.). <https://doi.org/10.15372/SJFS20230404>
7. Baskerville G.L. Use of Logarithmic Regression in the Estimation of Plant Biomass. *Canadian Journal of Forest Research*, 1972, vol. 2, no. 1, pp. 49–53.
<https://doi.org/10.1139/x72-009>

8. Delerue F., Scattolin M., Atteia O., Cohen G.J.V., Franceschi M., Mench M. Biomass Partitioning of Plants under Soil Pollution Stress. *Communications Biology*, 2022, vol. 5, art. no. 365. <https://doi.org/10.1038/s42003-022-03307-x>
9. Delong V.A. *Zipf's Law and Zeta Distribution*: Bachelor Thesis. Prague, Czech Technical University in Prague, 2011. 42 p.
10. Deng C., Ma F., Xu X., Zhu B., Tao J., Li Q. Allocation Patterns and Temporal Dynamics of Chinese Fir Biomass in Hunan Province, China. *Forests*, 2023, vol. 14, no. 2, art. no. 286. <https://doi.org/10.3390/f14020286>
11. Dolezal J., Jandova V., Macek M., Liancourt P. Contrasting Biomass Allocation Responses across Ontogeny and Stress Gradients Reveal Plant Adaptations to Drought and Cold. *Functional Ecology*, 2021, vol. 35, iss. 1, pp. 32–42. <https://doi.org/10.1111/1365-2435.13687>
12. Duanmu Z., Zhu Z., Zhao W., Chen A., Wang Z., Cao S., Li D., Luo Y., Myneni R.B. Changes in Leaf and Root Carbon Allocation of Global Vegetation Simulated by the Optimally Integrated Ecosystem Models. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2025, vol. 362, art. no. 110366. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2024.110366>
13. Freschet G.T., Swart E.M., Cornelissen J.H.C. Integrated Plant Phenotypic Responses to Contrasting Above- and Below-Ground Resources: Key Roles of Specific Leaf Area and Root Mass Fraction. *New Phytologist*, 2015, vol. 206, iss. 4, pp. 1247–1260. <https://doi.org/10.1111/nph.13352>
14. Liu R., Yang X., Gao R., Hou X., Huo L., Huang Z., Cornelissen J.H.C. Allometry Rather than Abiotic Drivers Explains Biomass Allocation among Leaves, Stems and Roots of *Artemisia* across a Large Environmental Gradient in China. *Journal of Ecology*, 2021, vol. 109, iss. 2, pp. 1026–1040. <https://doi.org/10.1111/1365-2745.13532>
15. Poorter H., Jagodzinski A.M., Ruiz-Peinado R., Kuyah S., Luo Y., Oleksyn J., Usoltsev V.A., Buckley T.N., Reich P.B., Sack L. How does Biomass Allocation Change with Size and Differ among Species? An Analysis for 1200 Plant Species from Five Continents. *New Phytologist*, 2015, vol. 208, iss. 3, pp. 736–749. <https://doi.org/10.1111/nph.13571>
16. Skarpaas O., Meineri E., Bargmann T., Pötsch C., Töpper J., Vandvik V. Biomass Partitioning in Grassland Plants along Independent Gradients in Temperature and Precipitation. *Perspectives in Plant Ecology, Evolution and Systematics*, 2016, vol. 19, pp. 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.ppees.2016.01.006>
17. Temme A.A., Liu J.C., Cornwell W.K., Aerts R., Cornelissen J.H.C. Hungry and Thirsty: Effects of CO₂ and Limited Water Availability on Plant Performance. *Flora*, 2019, vol. 254, pp. 188–193. <https://doi.org/10.1016/j.flora.2018.11.006>
18. Tsogetsai Khan T., Yang X., Gao R., Liu J., Tang W., Liu G., Ye X., Huang Z. Biomass Allocation between Reproductive and Vegetative Organs of *Artemisia* along a Large Environmental Gradient. *BMC Plant Biology*, 2025, vol. 25, art. no. 27. <https://doi.org/10.1186/s12870-024-06030-3>
19. Umaña M.N., Needham J., Fortunel C. From Seedlings to Adults: Linking Survival and Leaf Functional Traits over Ontogeny. *Ecology*, 2025, vol. 106, iss. 1, art. no. e4469. <https://doi.org/10.1002/ecy.4469>
20. Vasseur F., Exposito-Alonso M., Ayala-Garay O.J., Wang G., Enquist B.J., Vile D., Violle C., Weigel D. Adaptive Diversification of Growth Allometry in the Plant *Arabidopsis thaliana*. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2018, vol. 115, iss. 13, pp. 3416–3421. <https://doi.org/10.1073/pnas.1709141115>

Конфликт интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов
Conflict of interest: The authors declare that there is no conflict of interest

Вклад авторов: Все авторы в равной доле участвовали в написании статьи
Authors' Contribution: All authors contributed equally to the writing of the article