

УДК 528.88+504.732
DOI: 10.7868/S25000640260307

ПРЯМОЕ И ОПОСРЕДОВАННОЕ ВЛИЯНИЕ АБИОТИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ НА ПРОДУКТИВНОСТЬ ТРАВЯНИСТЫХ СТЕПЕЙ: СТАТИСТИЧЕСКАЯ РЕКОНСТРУКЦИЯ ПРИЧИННО-СЛЕДСТВЕННЫХ СВЯЗЕЙ

© 2026 г. И.И. Стрельников¹, А.А. Магаева¹, И.В. Шевердяев¹

Аннотация. Степные экосистемы критически важны для глобального стока углерода, но уязвимы к климатическим и антропогенным воздействиям. Глобальный вклад степей и других травяных экосистем в наземный сток углерода оценивается примерно в 0,5 Пг С в год, что составляет около 18 % от общего объема поглощения антропогенных парниковых газов наземными экосистемами. Понимание естественного абиотического базиса служит точкой отсчета для оценки антропогенного влияния на степные ландшафты. Цель настоящего исследования – применить метод обучения DAG для выявления и количественной оценки причинно-следственных связей между абиотическими факторами (топографией, почвенными и климатическими характеристиками) и надземной фитомассой степных экосистем. На степных участках в пределах Луганской и Донецкой народных республик (ЛНР и ДНР) было сгенерировано 10000 случайных точек. Для каждой точки из данных Sentinel-2 Level-2A (2021–2025 гг.) извлечены временные ряды индексов NDVI, EVI, NDWI и BSI, сглаженные методом дискретного косинусного преобразования. Итоговая выборка составила 50000 наблюдений. Для конвертации значений вегетационных индексов в количественные оценки надземной фитомассы использовали данные полевых измерений (2024–2025 гг.) в доступных районах ДНР и ЛНР на 65 пробных площадках, на которых в период активной вегетации проводили скашивание и взвешивание надземной фитомассы. Байесовская сеть выявила трехкаскадную архитектуру, где макроклимат и топография детерминируют почвенные свойства, напрямую управляющие продуктивностью. Доминирующую роль играет доступность влаги (осадки и индекс топографической влажности), объясняющая 20,3 % дисперсии фитомассы. Эта гидрологическая детерминированность указывает на высокую уязвимость степей к аридизации. Сформирована методологическая основа для разделения естественной изменчивости и деградации, необходимая для разработки природоориентированного землепользования и сохранения наземного стока углерода.

Ключевые слова: степные экосистемы, надземная фитомасса, направленные ациклические графы (DAG), абиотический базис, аридизация, сток углерода.

DIRECT AND INDIRECT EFFECTS OF ABIOTIC FACTORS ON THE PRODUCTIVITY OF GRASS STEPPES: STATISTICAL RECONSTRUCTION OF CAUSE-AND-EFFECT RELATIONSHIPS

I.I. Strelnikov¹, A.A. Magaeva¹, I.V. Sheverdyayev¹

Abstract. Steppe ecosystems are critically important for global carbon sink, but they are vulnerable to climatic and anthropogenic impacts. The global contribution of steppes and other grass ecosystems to terrestrial carbon sink is estimated at about 0.5 Pg C per year, which is about 18% of the total anthropogenic greenhouse gas uptake by terrestrial ecosystems. Understanding the natural abiotic basis is a starting point for assessing the anthropogenic impact on steppe landscapes. The purpose of this study is to apply the DAG learning method to identify and quantify the causal relationships between abiotic factors (topography, soil and climatic features)

¹ Донецкий ботанический сад (Donetsk Botanical Garden, Donetsk, Russian Federation), Российская Федерация, 283023, г. Донецк, пр. Ильича, 110, e-mail: ivanstrel87@gmail.com

and the aboveground phytomass of steppe ecosystems. 10,000 random points were generated in the steppe areas within the Lugansk and Donetsk people's republics (LPR and DPR). For each point, time series of NDVI, EVI, NDWI, and BSI indices smoothed by the discrete cosine transform method were extracted from Sentinel-2 Level-2A data (2021–2025). The final sample was 50,000 observations. To convert the values of vegetation indices into quantitative estimates of aboveground phytomass, field measurement data of 2024–2025 was used in accessible areas of the DPR and LPR at 65 trial sites, where mowing and weighing of aboveground phytomass was carried out during the active vegetation period. The Bayesian network has revealed a three-stage architecture, where the macroclimate and topography determine the soil properties that directly control productivity. The dominant role is played by the availability of moisture (precipitation and topographic wetness index), which explains 20.3% of the phytomass dispersion. This hydrological determinism indicates the high vulnerability of the steppes to aridization. The work forms a methodological basis for the separation of natural variability and degradation, necessary for the development of nature-based land management and conservation of terrestrial carbon runoff.

Keywords: steppe ecosystems, aboveground biomass, Directed Acyclic Graphs (DAG), abiotic baseline, aridification, carbon sink.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ (REFERENCES)

1. Liu L., Sayer E.J., Deng M., Li P., Liu W., Wang X., Yang S., Huang J., Luo J., Su Y., Grünzweig J.M., Jiang L., Hu S., Piao S. 2023. The grassland carbon cycle: mechanisms, responses to global changes, and potential contribution to carbon neutrality. *Fundamental Research*. 3(2): 209–218. doi: 10.1016/j.fmre.2022.09.028
2. Liu C., Jiang H., Guo X. 2025. Converging patterns of heterotrophic respiration between growing and non-growing seasons in northern temperate grasslands. *Plants*. 14(16): 2590. doi: 10.3390/plants14162590
3. Fedorov N., Shirokikh P., Zhigunova S., Baisheva E., Komissarov M., Muldashev A., Gabbasova D., Akhmetova M., Tuktamyshev I., Bikbaev I., Shendel G., Gulov D., Aivazyan M., Gimazetdinov V., Martynenko V. 2025. Productivity, carbon sequestration and species diversity in virgin and secondary meadow steppes of the Bashkir Cis-Urals. *Scientific Reports*. 15(1): 17268. doi: 10.1038/s41598-025-02493-y
4. Chen Y., Ju W., Groisman P., Li J., Propastin P., Xu X., Zhou W., Ruan, H. 2017. Quantitative assessment of carbon sequestration reduction induced by disturbances in temperate Eurasian steppe. *Environmental Research Letters*. 12(11): 115005. doi: 10.1088/1748-9326/aa849b
5. Corona P., Badalamenti E., Pasta S., La Mantia T. 2016. Carbon storage of Mediterranean grasslands. *Anales Del Jardín Botánico de Madrid*. 73(1): e029. doi: 10.3989/ajbm.2406
6. Jiao C., Yu G., Ge J., Chen X., Zhang C., He N., Chen Z., Hu Z. 2017. Analysis of spatial and temporal patterns of aboveground net primary productivity in the Eurasian steppe region from 1982 to 2013. *Ecology and Evolution*. 7(14): 5149–5162. doi: 10.1002/ece3.3027
7. Huang X., Liu X., Liao L., Li J., Luo G., Li B., Ma Z., Wang Z. 2025. Grazing decreases carbon storage in the Qinghai-Tibet Plateau grasslands. *Communications Earth & Environment*. 6(1): 198. doi: 10.1038/s43247-025-02162-y
8. Wang R., Feng Q., Jin Z., Liang T. 2022. The restoration potential of the grasslands on the Tibetan Plateau. *Remote Sensing*. 14(1): 80. doi: 10.3390/rs14010080
9. Yi C., Pendall E., Ciais P. 2015. Focus on extreme events and the carbon cycle. *Environmental Research Letters*. 10(7): 070201. doi: 10.1088/1748-9326/10/7/070201
10. Chang X.F., Zhu X.X., Wang S.P., Cui S.J., Luo C.Y., Zhang Z.H., Wilkes A. 2014. Impacts of management practices on soil organic carbon in degraded alpine meadows on the Tibetan Plateau. *Biogeosciences*. 11(13): 3495–3503. doi: 10.5194/bg-11-3495-2014
11. Ding J., Mi W., Wen Q., Luo A., Hou K., Wu X., Xu H. 2022. Effects of the main ecological restoration projects on grassland carbon sequestration in Ningxia on the Loess Plateau. *Frontiers in Environmental Science*. 10: 908236. doi: 10.3389/fenvs.2022.908236
12. Polyakova M.A., Dembicz I., Becker T., Becker U., Demina O.N., Ermakov N., Filibeck G., Guarino R., Janišová M.,

- Jaunatre R., Kozub L., Steinbauer M.J., Suzuki K., Dengler J. 2016. Scale- and taxon-dependent patterns of plant diversity in steppes of Khakassia, South Siberia (Russia). *Biodiversity and Conservation*. 25(12): 2251–2273. doi: 10.1007/s10531-016-1093-y
13. Yan Z., Sun B., Gao Z., Qin P., Gao T., Li Y. 2024. Unveiling grassland dynamics: trends and drivers of degradation and improvement in the Eurasian Steppe since 2000. *GIScience & Remote Sensing*. 61(1): 2430638. doi: 10.1080/15481603.2024.2430638
14. Ren H., Schönbach P., Wan H., Gierus M., Taube F. 2012. Effects of grazing intensity and environmental factors on species composition and diversity in typical steppe of Inner Mongolia, China. *PLoS One*. 7(12): e52180. doi: 10.1371/journal.pone.0052180
15. Reintsma K.M., Szczypinski M., Running S.W., Coons S.P., Dreitz V.J. 2024. Sagebrush steppe productivity, environmental complexity, and grazing: insights from remote sensing and mixed-effect modeling. *Rangeland Ecology & Management*. 95: 20–29. doi: 10.1016/j.rama.2024.04.001
16. Zhu A., Wu Q., Han G., Wang R., Wang B., Yang Y., Wang R., Wu L. 2025. Aboveground biomass and importance value of constructive species in desert steppe are co-regulated by grazing intensity and climate. *Ecology and Evolution*. 15(10): e72243. doi: 10.1002/ece3.72243
17. Jia X., Xie B., Shao M., Zhao C. 2015. Primary productivity and precipitation-use efficiency in temperate grassland in the Loess Plateau of China. *PLoS One*. 10(8): e0135490. doi: 10.1371/journal.pone.0135490
18. Ma L., Guo C., Xin X., Yuan S., Wang R. 2013. Effects of belowground litter addition, increased precipitation and clipping on soil carbon and nitrogen mineralization in a temperate steppe. *Biogeosciences*. 10(11): 7361–7372. doi: 10.5194/bg-10-7361-2013
19. Guo X., Zuo X., Yue P., Li X., Hu Y., Chen M., Yu Q. 2022. Direct and indirect effects of precipitation change and nutrients addition on desert steppe productivity in Inner Mongolia, northern China. *Plant and Soil*. 471(1/2): 527–540. doi: 10.1007/s11104-021-05206-2
20. Han Y., Zhang H., Luo X., Zhao B., Liu Z. 2026. Exploring environmental drivers of spatiotemporal variability in net primary productivity increase across steppe ecosystems. *Ecological Indicators*. 185: 114764. doi: 10.1016/j.ecolind.2026.114764
21. Yang K., Luo Y., Li M., Zhong S., Liu Q., Li X. 2022. Reconstruction of Sentinel-2 image time series using Google Earth engine. *Remote Sensing*. 14(17): 4395. doi: 10.3390/rs14174395
22. Neal J., Hawker L. 2023. FABDEM V1-2. *University of Bristol*. Available at: <https://data.bris.ac.uk/data/dataset/s5hqmjcdj8yo2ibzi9b4ew3sn> (дата обращения: 18.08.2025). doi: 10.5523/bris.s5hqmjcdj8yo2ibzi9b4ew3sn
23. Conrad O., Bechtel B., Bock M., Dietrich H., Fischer E., Gerlitz L., Wehberg J., Wichmann V., Böhner J. 2015. System for automated geoscientific analyses (SAGA) v. 2.1.4. *Geoscientific Model Development*. 8(7): 1991–2007. doi: 10.5194/gmd-8-1991-2015
24. Fang C., Verbrugghe N., Sigurdsson B.D., Ostonen I., Leblans N.I.W., Marañón-Jiménez S., Fuchslueger L., Sigurdsson P., Meeran K., Portillo-Estrada M., Verbruggen E., Richter A., Sardans J., Peñuelas J., Bahn M., Vicca S., Janssens I.A. 2023. Decadal soil warming decreased vascular plant above and belowground production in a subarctic grassland by inducing nitrogen limitation. *New Phytologist*. 240(2): 565–576. doi: 10.1111/nph.19177
25. Su Y., Wang J., Yang R., Yang X., Fan G. 2015. Soil texture controls vegetation biomass and organic carbon storage in arid desert grassland in the middle of Hexi Corridor region in Northwest China. *Soil Research*. 53(4): 366–376. doi: 10.1071/SR14207
26. Hersbach H., Bell B., Berrisford P., Hirahara S., Horányi A., Muñoz-Sabater J., Nicolas J., Peubey C., Radu R., Schepers D., Simmons A., Soci C., Abdalla S., Abellan X., Balsamo G., Bechtold P., Biavati G., Bidlot J., Bonavita M., De Chiara G., Dahlgren P., Dee D., Diamantakis M., Dragani R., Flemming J., Forbes R., Fuentes M., Geer A., Haimberger L., Healy S., Hogan R.J., Hólm E., Janisková M., Keeley S., Laloyaux P., Lopez P., Lupu C., Radnoti G., de Rosnay P., Rozum I., Vamborg F., Villaume S., Thépaut J.-N. 2020. The ERA5 global reanalysis. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*. 146(730): 1999–2049. doi: 10.1002/qj.3803
27. Pearl J. 2009. *Causality: models, reasoning, and inference*. Cambridge, Cambridge University Press: 384 p.
28. Scutari M. 2010. Learning Bayesian networks with the bnlearn R package. *Journal of Statistical Software*. 35(3): 1–22. doi: 10.18637/jss.v035.i03
29. R Core Team. A language and environment for statistical computing. *The R Project for Statistical Computing*. URL: <https://www.r-project.org/> (дата обращения: 01.05.2026).
30. Ju X., Wang B., Wu L., Zhang X., Wu Q., Han G. 2024. Grazing decreases net ecosystem carbon exchange by decreasing shrub and semi-shrub biomass in a desert steppe. *Ecology and Evolution*. 14(6): e11528. doi: 10.1002/ece3.11528

Поступила 21.04.2026

Принята 04.08.2026