



DOI: <https://doi.org/10.15688/nsr.jvolsu.2023.3.2>

UDC 502.52:630*114.35

LBC 28.080.69

INVESTIGATION OF THE INFLUENCE OF CLIMATIC FACTORS ON THE RATE OF DECOMPOSITION OF FOREST LITTER

Tabriz M. Tahmazov

National Aerospace Agency, Baku, Azerbaijan

Abstract. The decomposition of the litter changes its indicators under the influence of climatic changes. Taking into account the impact of this process on the global carbon cycle, the decomposition process is a feedback affecting future climate change. The special role of the litter decomposition process in the overall carbon cycle on a regional and global scale determines the importance of studying the regularity of the influence of climatic parameters on the rate of decomposition of forest litter. Known approaches to solving this problem are based on a probabilistic analysis of the relationship between climatic factors. It is indicated that the task of determining the relationship between temperature and soil moisture when assessing their joint impact on the decomposition rate of forest litter can be formulated in a slightly different way. From the point of view of the ecology of the forest ecosystem, the following statement of the problem is no less interesting: under what relationship of these factors can the decomposition rate reach extreme values? The author proposes a representation of the problem being solved in the form of an extreme problem, taking into account some restrictive conditions imposed on the desired function of the relationship between temperature and soil moisture. The proposed new approach to solving the problem of the influence of climatic factors such as soil temperature and humidity, which consists of calculating the conditions leading to an extremum of the decomposition rate of forest litter, allows us to determine the function of the relationship between these factors and the point at which the decomposition rate reaches a peak. The solution to the problem allowed us to calculate the optimal type of the studied relationship, at which the rate of decomposition of the forest litter reaches an extreme. The results of the study can be used in modeling the processes of the influence of climatic factors on the overall carbon cycle of the forest ecosystem.

Key words: forest litter, climatic factor, decomposition, forest ecosystem, extreme task.

Citation. Tahmazov T.M. Investigation of the Influence of Climatic Factors on the Rate of Decomposition of Forest Litter. *Prirodnye sistemy i resursy* [Natural Systems and Resources], 2023, vol. 13, no. 3, pp. 15-20. (in Russian). DOI: <https://doi.org/10.15688/nsr.jvolsu.2023.3.2>

УДК 502.52:630*114.35

ББК 28.080.69

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ КЛИМАТИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ НА СКОРОСТЬ РАЗЛОЖЕНИЯ ЛЕСНОЙ ПОДСТИЛКИ

Табриз Мубариз оглы Тахмазов

Национальное аэрокосмическое агентство, г. Баку, Азербайджан

Аннотация. Разложение подстилки меняет свои показатели под воздействием климатических изменений. С учетом влияния этого процесса на глобальный углеродный цикл процесс декомпозиции представляет собой обратную связь, воздействующую на будущие климатические изменения. Особая роль процесса декомпозиции подстилки в общем углеродном цикле в региональном и глобальном масштабах определяет важность исследования закономерности влияния климатических параметров на скорость разложения лесной подстилки. Известные подходы к решению данной задачи базируются на вероятностном анализе взаимосвязи климатических факторов. Указывается, что задача определения взаимосвязи температуры и влажности почвы при оценке их совместного воздействия на скорость декомпозиции лесной подстилки может быть сформулирована в несколько иной плоскости. С точки зрения экологии лесной экосистемы не менее интересной является такая постановка задачи: при каком взаимоотношении указанных факторов скорость деком-

позиции может достигать экстремальных величин? Автором предлагается представление решаемого вопроса в виде экстремальной задачи с учетом некоторого ограничительного условия налагаемого на искомую функцию взаимосвязи температуры и влажности почвы. Предлагаемый новый подход к решению задачи влияния таких климатических факторов, как температура и влажность почвы, заключающийся в формировании задачи вычисления условий, приводящих к экстремуму скорости декомпозиции лесной подстилки, позволяет определить функцию связи между указанными факторами, при которой скорость декомпозиции достигает максимума. Решение задачи позволило вычислить оптимальный вид исследуемой взаимосвязи, при которой скорость разложения лесной подстилки достигает экстремума. Результаты исследования могут быть использованы при моделировании процессов влияния климатических факторов на общий углеродный цикл по части лесной экосистемы.

Ключевые слова: лесная подстилка, климатический фактор, разложение, лесная экосистема, экстремальная задача.

Цитирование. Тахмазов Т. М. Исследование влияния климатических факторов на скорость разложения лесной подстилки // Природные системы и ресурсы. – 2023. – Т. 13, № 3. – С. 15–20. – DOI: <https://doi.org/10.15688/nsr.jvolsu.2023.3.2>

Введение

Разложение лесной подстилки играет важную роль в общем цикле возникновения питательных веществ, а также накопления углерода в лесной среде. Этот процесс поддерживает природную динамику лесной экосистемы, играя важную роль в глобальном балансе CO_2 [2; 14; 15]. Связь между климатическими факторами и показателями декомпозиции лесной подстилки была исследована в работах [3; 5; 8]. При этом, согласно [8], климатические факторы воздействуют на процессы разложения подстилки как прямо, так и косвенно. С одной стороны, климат воздействует на бактерии и микроорганизмы, с другой стороны, приводит к качественным и количественным изменениям самой подстилки. В локальном масштабе факторами, воздействующими на процесс разложения подстилки являются влажность почвы, наличие питательных веществ в почве, озон, структура и содержание листьев, наличие осадков. Согласно [6; 13], скорость декомпозиции подстилки экспоненциально увеличивается с ростом температура почвы вплоть до некоторой оптимальной величины.

В общем случае, разложение подстилки меняет свои показатели под воздействием климатических изменений. Следовательно, с учетом влияния этого процесса на глобальный углеродный цикл, процесс декомпозиции представляет собой обратную связь, воздействующую на будущие климатические изменения.

Во многих работах, посвященных процессам декомпозиции лесной подстилки, воздействующие климатические факторы рассматриваются в качестве неизменных величин [4; 10]. Вместе с тем микроклиматические факторы достаточно изменчивы, что должно быть учтено при моделировании процессов разложения лесной подстилки.

В качестве примера рассмотрим, как учитываются климатические факторы в наиболее развитой модели декомпозиции подстилки, предложенной в работе [9]. Согласно этой модели, исходное органическое вещество (M_0) состоит из двух составляющих: лигнина (M_1) и целлюлозы (M_2). Следовательно,

$$M_0 = M_1 \cdot (1 - \omega) + M_2 \cdot \omega, \quad (1)$$

где M – долевой коэффициент.

При этом процесс декомпозиции лесной подстилки отображается следующей формулой:

$$M(t) = M_1 \cdot \exp(-k_1 \cdot CDI \cdot t) + M_2 \cdot \exp(-k_2 \cdot CDI \cdot t), \quad (2)$$

где $M(t)$ – количество биомассы в лесной подстилке; $M_1 = M_0(1 - \omega)$; $M_2 = M_0\omega$; k_1, k_2 – соответствующие скорости декомпозиции; CDI – климатический индекс декомпозиции.

Согласно [9], скорости декомпозиции k_1 и k_2 увеличиваются с ростом температуры и влажности.

$$k_1, k_2 = f(RWC) \cdot f(t), \quad (3)$$

где $f(RWC)$ – показатель, зависящий от влажности почвы; $f(t)$ – показатель, зависящий от температуры почвы.

В целом, как отмечается в самой работе [9], взаимосвязь температуры и влажности имеет достаточно сложный характер, тем более, что в указанной модели информация о влажности берется путем оценки достаточно общего вегетационного индекса – нормализованного разностного дифференциального индекса $NDVI$, склонного к насыщению при достаточно высокой степени развития растительности, когда другой, не менее распространенный растительный индекс-индекс листовой площади (LAI) показывает достаточно высокие значения.

Указанные недостатки модели, предложенной в работе [9] диктует необходимость разработки более адекватной модели, в которой можно было бы учесть сложную связь между такими главенствующими факторами как температура и влажность почвы.

Вместе с тем задача определения взаимосвязи температуры и влажности почвы при оценке их совместного воздействия на скорость декомпозиции лесной подстилки может быть сформулирована в несколько иной плоскости. Для исследователей экологии лесной экосистемы может стать не менее интересной такая постановка задачи: при каком соотношении указанных факторов скорость декомпозиции может достигать экстремальных величин? Ниже нами предлагается методика, позволяющая решить указанный вопрос.

Результаты и их обсуждения

Следует отметить, что влияние температуры и влажности на процессы декомпозиции исследуется в течение нескольких десятков лет [1; 7].

Вместе с тем с учетом сформулированного выше подхода к решению задачи влияния климатических факторов на скорость декомпозиции наиболее подходящей известной моделью является модель, предложенная в работе [12]. Согласно этой работе, скорость декомпозиции лесной подстилки может быть вычислена по следующей формуле:

$$k = \alpha \exp(\beta_1 T + \beta_2 T^2) (1 - \exp(\gamma P_0)), \quad (4)$$

где T – температура (в Цельсиях); P_0 – годовая величина осадков; $\alpha, \beta_1, \beta_2, \gamma$ – параметры модели.

В работе [11], где используется модель (4), взаимосвязь температуры и осадков учитывается путем проведения вероятностного анализа на основе трех различных предположений о структуре модели. Отметим, что при рассмотрении проблемы влияния указанных климатических факторов в плане решения экстремальной задачи достижения наивысочайшей скорости декомпозиции достаточно принять единственное предположение, ограничивающее возможность выбора функции связи между T и P . В качестве такого целевого функционала можно рассмотреть следующее выражение:

$$F_1 = \int_0^{T_{\max}} \alpha \exp(\beta_1 T + \beta_2 T^2) (1 - \exp(\gamma P)) dT. \quad (5)$$

При этом подразумеваем выполнение следующих условий (предположений):

1. Существует некоторая оптимальная функция

$$P = f(T)_{\text{opt}}, \quad (6)$$

при которой функционал F_1 достигает максимальной величины.

2. Искомая оптимальная функция удовлетворяет следующему ограничительному условию

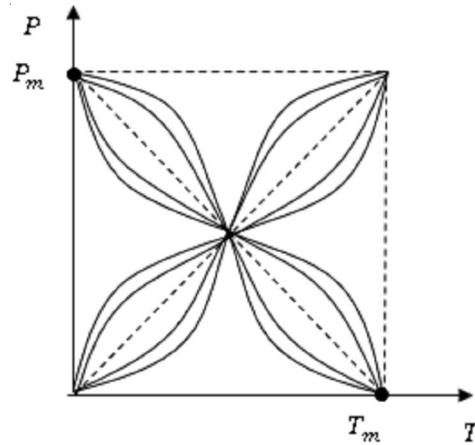
$$F_2 = \int_0^{T_{\max}} P(T) dT = C_1 = \text{const}. \quad (7)$$

Варианты функций $P(T)$ удовлетворяющих условию (7) приведены на рисунке.

С учетом (5) и (7) составим задачу безусловной вариационной оптимизации, целевой функционал F_0 которой имеет вид

$$F_0 = \int_0^{T_{\max}} \alpha \exp(\beta_1 T + \beta_2 T^2) (1 - \exp(\gamma P)) dT + \lambda \left[\int_0^{T_{\max}} P(T) dT - C \right], \quad (8)$$

где λ – множитель Лагранжа.



Примеры функций $P(T)$, удовлетворяющих условию (7)

Решение оптимизационной задачи (8) согласно методу Эйлера должно удовлетворить условию:

$$\frac{d\{\alpha \exp(\beta_1 T + \beta_2 T^2)(1 - \exp(\gamma P(T))) + \lambda P(T)\}}{dP(T)} = 0. \quad (9)$$

Из условия (9) получаем:

$$\alpha \exp(\beta_1 T + \beta_2 T^2)(-\gamma \exp(\gamma P(T))) + \lambda = 0. \quad (10)$$

Из выражения (10) получаем:

$$\gamma \exp(\gamma P(T)) = \frac{\lambda}{(\gamma \alpha \exp(\beta_1 T + \beta_2 T^2))}. \quad (11)$$

Из (11) получим:

$$P(T) = \frac{1}{\gamma} \ln \frac{\lambda}{\gamma \alpha \exp(\beta_1 T + \beta_2 T^2)}. \quad (12)$$

С учетом $\lambda = const$ можно заключить, что при наличии обратного логарифмической связи между $P(T)$ скорость декомпозиции лесной подстилки достигает экстремума.

Вычислим множитель Лагранжа. Из (12) находим:

$$P(T) = \frac{1}{\gamma} [\ln \lambda - \ln[\gamma \alpha \exp(\beta_1 T + \beta_2 T^2)]]. \quad (13)$$

Из (7) и (13) находим:

$$\int_0^{T_m} \frac{1}{\gamma} [\ln \lambda - \ln[\gamma \alpha \exp(\beta_1 T + \beta_2 T^2)]] dT = 0. \quad (14)$$

Из (14) получаем:

$$\frac{T_m \cdot \ln \gamma}{\gamma} = C - \frac{1}{\gamma} \int_0^{T_m} \ln[\gamma \alpha \exp(\beta_1 T + \beta_2 T^2)] dT. \quad (15)$$

Из (15) окончательно находим:

$$\gamma = \exp\left[\frac{\gamma}{T_m} \left[C - \frac{1}{\gamma} \int_0^{T_m} \ln[\gamma \alpha \exp(\beta_1 T + \beta_2 T^2)] dT\right]\right]. \quad (16)$$

Чтобы определить тип экстремума целевого (16) функционала (8) достаточно вычислить вторую производную интегранта в (8) по $P(T)$. Имеем:

$$\frac{d^2\{\alpha \exp(\beta_1 T + \beta_2 T^2)(1 - \exp(\gamma P(T))) + \lambda P(T)\}}{dP(T)^2} = \alpha \exp(\beta_1 T + \beta_2 T^2)(-\gamma^2 \exp(\gamma P(T))). \quad (17)$$

Так как вычисленная вторая производная всегда является отрицательной величиной, то целевой функционал (8) при решении (12), (16) достигает максимума, то есть разложение лесной подстилки происходит с максимально возможной скоростью.

Таким образом, предлагаемый новый подход к решению давно исследуемой задачи влияния таких климатических факторов, как температура и влажность почвы, заключающийся в формировании задачи вычисления условий, приводящих к экстремуму скорости декомпозиции лесной подстилки, позволяет определить функцию связи между указанными факторами, при которой скорость декомпозиции достигает максимума. Полученные в настоящей статье результаты могут быть полезными при оценке предельных экологических показателей лесной среды, которые реально ожидаемы при соблюдении некоторой вы-

численной взаимосвязи рассмотренных климатических показателей.

Заключение

Важность исследования закономерности влияния климатических параметров на скорость разложения лесной подстилки объясняется особой ролью процессом декомпозиции подстилки в общем углеродном цикле в региональном и глобальном масштабе. Существующие подходы к решению данной задачи в основном основываются на вероятностном анализе взаимосвязи рассматриваемых климатических факторов. В отличие от указанных модельных исследований, автором предлагается представление решаемого вопроса в виде экстремальной задачи с учетом некоторого ограничительного условия налагаемого на искомую функцию взаимосвязи между температурой и влажностью почвы. Решение составленной вариационной задачи позволило вычислить оптимальный вид указанной взаимосвязи, при которой скорость разложения лесной подстилки достигает максимума. Полученное решение может быть использовано при моделировании процессов влияния климатических факторов на общий углеродный цикл по части лесной экосистемы.

REFERENCES

1. Adair E.C., Parton W.J., Del Grosso S.J. et al. Simple Three-Pool Model Accurately Describes Patterns of Long-Term Litter Decomposition in Diverse Climates. *Global Change Biology*, 2008, no. 14 (11), pp. 2636-2660. DOI: <http://dx.doi.org/10.1111/j.1365-2486.2008.01674.x>
2. Bradford M.A., Wieder W.R., Bonan G.B. et al. Managing Uncertainty in Soil Carbon Feedbacks to Climate Change. *Nature Clim Change*, 2016, no. 6, pp. 751-758. DOI: <https://doi.org/10.1038/nclimate3071>
3. Cai A., Liang G., Yang W. et al. Patterns and Driving Factors of Litter Decomposition Across Chinese Terrestrial Ecosystems. *J. Clean. Prod.*, 2021, vol. 278, art. 123964. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123964>
4. Cornwell W.K., Cornelissen J.H.C., Amatangelo K. et al. Plant Species Traits Are the Predominant Control on Litter Decomposition Rates Within Biomes Worldwide. *Ecol. Lett.*, 2008, vol. 11, pp. 1065-1071. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1461-0248.2008.01219.x>
5. Froseth R.B., Bleken M.A. Effect of Low Temperature and Soil Type on the Decomposition Rate of Soil Organic Carbon and Clover Leaves and Related Priming Effect. *Soil Biol. Biochem.*, 2015, vol. 80, pp. 156-166. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.soilbio.2014.10.004>
6. He X., Lin Y., Han G. et al. The Effect of Temperature on Decomposition of Leaf Litter from Two Tropical Forests by a Microcosm Experiment. *Eur. J. Soil Biol.*, 2010, vol. 46, pp. 200-207. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ejsobi.2010.02.001>
7. Liski J., Ilvesniemi H., Makela A., Starr M. Model Analysis of the Effects of Soil Age Fires and Harvesting on the Carbon Storage of Boreal Forest Soils. *European Journal of Soil Science*, 1998, no. 49, pp. 407-416. DOI: <http://dx.doi.org/10.1046/j.1365-2389.1998.4930407.x>
8. Petraglia A., Cacciatori C., Chelli S. et al. Litter Decomposition Effects of Temperature Driven by Soil Moisture and Vegetation Type. *Plant Soil*, 2019, vol. 435, pp. 187-200. DOI: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11104-018-3889-x>
9. Ranucci M., Perez M., Lombardi D., Vitale M. Is the Current Modelling of Litter Decomposition Rates Reliable Under Limiting Environmental Conditions Induced by Ongoing Climate Change? *Soil Syst.*, 2022, vol. 6, p. 81. DOI: <https://doi.org/10.3390/soilsystems6040081>
10. Saccone P., Morin S., Bapist F. et al. The Effects of Snowpack Properties and Plant Strategies on Litter Decomposition During Winter in Supalpine Meadows. *Plant Soil*, 2013, vol. 363, pp. 215-229.
11. Tuomi M., Thum T., Jarvinen H. et al. Leaf Litter Decomposition-Estimates of Global Variability Based on Yasso07 Model. *Ecological Modelling*, 2009, vol. 220, pp. 3362-3371. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2009.05.016>
12. Tuomi M., Vahnaala P., Karhu K. et al. Heterotrophic Soil Respiration-Comparison of Different Models Describing Its Temperature Dependence. *Ecological Modelling*, 2008, vol. 211, pp. 182-190. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2007.09.003>
13. Van Meeteren M.J.M., Tietema A., Westerveld J.W. Regulation of Microbial Carbon, Nitrogen and Phosphorus Transformations by Temperature and Moisture During Decomposition of Calluna Vulgaris Litter. *Biol. Fertil. Soils*, 2007, vol. 44, pp. 103-112. DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/s00374-007-0184-z>
14. Zhang M., Cheng X., Geng Q. et al. Leaf Litter Traits Predominantly Control Litter Decomposition in Streams Worldwide. *Glob. Ecol. Biogeogr.*, 2019, vol. 28, pp. 1469-1486. DOI: <http://dx.doi.org/10.1111/geb.12966>
15. Zhang T., Luo Y., Chen H.Y.H., Ruan H. Responses of Litter Decomposition and Nutrient Release to N Addition: A Meta-Analysis of Terrestrial Ecosystems. *Appl. Soil Ecol.*, 2018, vol. 128, pp. 35-42. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.apsoil.2018.04.004>

Information About the Author

Tabriz M. Tahmazov, Doctoral Student, National Aerospace Agency, Akhundova Suleymana Sani St, 1, AZ1115 Baku, Azerbaijan, thmzovtbriz@gmail.com, thmzov66@gmail.com

Информация об авторе

Табриз Мубариз оглы Тахмазов, докторант, Национальное аэрокосмическое агентство, ул. Ахундова Сулеймана Сани, 1, AZ1115 г. Баку, Азербайджан, thmzovtbriz@gmail.com, thmzov66@gmail.com