

РАЗДЕЛ III

ЭКОЛОГИЯ. БИОРАЗНООБРАЗИЕ

[ECOLOGY. BIODIVERSITY]

УДК: 502.52

DOI: 10.24412/2658-4441-2023-3-76-82

Т.М. ТАХМАЗОВ

Национальное аэрокосмическое агентство (Баку, Азербайджанская Республика)

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ КЛИМАТИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ НА СКОРОСТЬ РАЗЛОЖЕНИЯ ЛЕСНОЙ ПОДСТИЛКИ

Особая роль процесса декомпозиции лесной подстилки в общем углеродном цикле в региональном и глобальном масштабе определяет важность исследования закономерности влияния климатических параметров на скорость её разложения. Подходы к решению данной задачи базируются на вероятностном анализе взаимосвязи климатических факторов. Автором предлагается представление решаемого вопроса в виде экстремальной задачи с учётом некоторого ограничительного условия налагаемого на искомую функцию взаимосвязи температуры и влажности почвы. 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.

Рис. 1. Библ. 18 назв. С. 76–82.

T.M. TAHMAZOV

National Aerospace Agency (Baku, Republic of Azerbaijan)

STUDY OF CLIMATIC FACTORS INFLUENCE ON THE DECOMPOSITION RATE OF FOREST LEAVES COVER

The special role of decomposition process of forest leaves cover in the overall carbon cycle on a regional and global demention determines the importance of studying the regularity of climatic parameters influence of forest leaves cover decomposition. Approaches for solving this problem are based on a probability analysis of the relationship between climatic factors. The author proposes a representation of the problem to be solved in the form of an extremal problem, taking into account some restrictive condition imposed on the desired function of the relationship between temperature and soil moisture. The solution of the problem made it possible to calculate the optimal type of the relationship under study, at which the rate of decomposition of the forest leaves cover reaches an extremum. The study results can be used in processes modeling for climatic factors influence on the overall carbon cycle in part of the forest ecosystem.

Keywords: forest leaves cover, climatic factor, decomposition, forest ecosystem, extreme problem.

Figure 1. References 18. P. 76–82.

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 (Bradford et al., 2016; Zhang et al., 2018; Zhang et al., 2019). Связь между климатическими факторами и показателями декомпозиции лесной подстилки была исследована в работах (Cai et al., 2021; Froseth, Bleken, 2015; Petraglia et al., 2019). При этом, согласно (Petraglia et al., 2019), 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 (Van Meeteren et al., 2007; He et al., 2010), скорость декомпозиции подстилки экспоненциально увеличивается с ростом температуры почвы вплоть до некоторой оптимальной величины.

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

Во многих работах, посвящённых процессам декомпозиции лесной подстилки, воздействующие климатические факторы рассматриваются в качестве неизменных величин (Cornwell et al., 2008; Saccone et al., 2013). 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 (Ranucci et al., 2022). Согласно этой модели, исходное органическое вещество M_0 состоит из двух составляющих: лигнина (M_1) и целлюлозы (M_2). Следовательно:

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

где: ω — долевой коэффициент.

При этом процесс декомпозиции лесной подстилки отображается следующим уравнением:

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

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 (Meentemeyer, 1978).

Согласно (Ranucci et al., 2022), 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 (Ranucci et al., 2022), взаимосвязь температуры и влажности имеет достаточно сложный характер, тем более, что в указанной модели информация о влажности берётся путём оценки достаточно общего вегетационного индекса — нормализованного разностного дифференциального индекса $NDVI$, склонного к насыщению при достаточно высокой степени развития растительности, когда другой, не менее распространённый растительный индекс — а именно индекс листовой площади (LAI) показывает достаточно высокие значения.

Указанные недостатки модели, предложенные в работе (Ranucci et al., 2022) диктуют 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.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ. Следует отметить, что влияние температуры и влажности на процессы декомпозиции исследуются в течение нескольких десятков лет (Meentemeyer, 1978; Parton et al., 1987; Liski et al., 1998; Adair et al., 2008).

Вместе с тем, с учётом сформулированного выше подхода к решению задачи влияния климатических факторов на скорость декомпозиции наиболее подходящей известной моделью является модель, предложенная в работе (Tuomi et al., 2008). 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 — годовое количество осадков; α , β_1 , β_2 , γ — параметры модели. В работе (Tuomi et al., 2009), где используется модель (4) взаимосвязь температуры и осадков учитывается путём проведения вероятностного анализа на основе трёх различных предположений о структуре модели. Отметим, что при рассмотрении проблемы влияния указанных климатических факторов в плане решения экстремальной задачи достижения максимальной скорости декомпозиции достаточно принять единственное предположение, ограничивающее возможности 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

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

при которой функционал F_1 достигает максимальной величины;

2. Искомая оптимальная функция удовлетворяет следующему ограничительному условию:

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

Варианты функций $P(T)$, удовлетворяющих условию (7), приведены на рисунке 1.

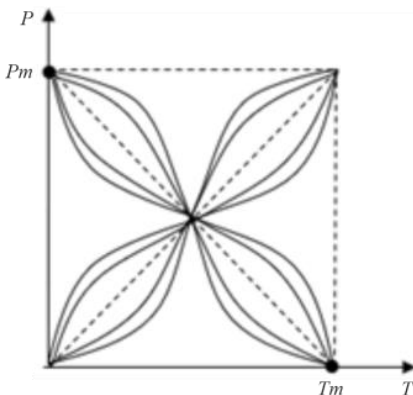


Рисунок 1. Примеры функций $P(T)$, удовлетворяющих условию (7)

С учётом (5) и (7) составим задачу безусловной вариационной оптимизации целевого функционала F_0 , который 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.

Решение оптимизационной задачи (8) согласно (Эльсгольц, 1974) должно удовлетворить условию:

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

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 учётом $\lambda = const$ 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 интеграла 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, т. е. разложение лесной подстилки происходит с максимально возможной скоростью.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ. 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 вычисленной взаимосвязи рассмотренных климатических показателей.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ. Важность исследования закономерности влияния климатических параметров на скорость разложения лесной подстилки объясняется особой ролью про-

цесса её декомпозиции в общем углеродном цикле в региональном и глобальном масштабе. Существующие подходы к решению данной задачи преимущественно основываются на вероятностном анализе взаимосвязи рассматриваемых климатических факторов. В отличие от указанных модельных исследований, автором предлагается представление решаемого вопроса в виде экстремальной задачи с учётом 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.

ЛИТЕРАТУРА

- Эльсгольц Л.Е. Дифференциальные уравнения и вариационное исчисление. – М.: Наука, 1974. – 432 с.
- Adair E.C., Parton W.J., Del Grosso S.J., Silver W.L., Harmon M.E., Hall S.A., Burke I.C., Hart S.C. Simple three-pool model accurately describes patterns of long-term litter decomposition in diverse climates // *Global Change Biology*. – 2008. – № 14. – P. 2636–2660.
- Bradford M.A., Wieder W.R., Bonan G.B., Fierer N., Raymond P.A., Crowther T.W. Managing uncertainty in soil carbon feedbacks to climate change // *Nature Climate Change*. – 2016. – № 6. – P. 751–758.
- Cai A., Liang G., Yang W., Zhu J., Han T., Zhang W., Xu M. Patterns and driving factors of litter decomposition across Chinese terrestrial ecosystems // *Journal of Cleaner Production*. – 2021. – № 278. – 123964.
- Cornwell W.K., Cornelissen J.H.C., Amatangelo K., Dorrepaal E., Eviner V.T., Godoy O., Hobbie S.E., Hoorens B., Kurokawa H., Perez-Harguindeguy N. Plant Species traits are the predominant control on litter decomposition rates within biomes worldwide // *Ecology Letters*. – 2008. – № 11. – P. 1065–1071.
- 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 Biology and Biochemistry*. – 2015. – № 80. – P. 156–166.
- He X., Lin Y., Han G., Guo P., Tian X. The effect of temperature on decomposition of leaf litter from two tropical forests by a microcosm experiment // *European Journal Soil Biology*. – 2010. – № 46. – P. 200–207.
- 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. – № 49. – P. 407–416.
- Meentemeyer V. Macroclimate and lignin control of litter decomposition rates // *Ecology*. – 1978. – № 59. – P. 465–472.
- Parton W.J., Schimel D.S., Cole C.V., Ojima D.S. Analysis of factors controlling soil organic levels of grasslands in the Great Plains // *Soil Science Society of America Journal*. – 1987. – № 51. – P. 1173–1179.
- Petraglia A., Cacciatori C., Chelli S., Fenu G., Calderisi G., Gargano D., Abeli T., Orsenigo S., Carbone M. Litter decomposition effects of temperature driven by soil moisture and vegetation type // *Plant and Soil*. – 2019. – № 435. – P. 187–200.
- 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 Systems* [Электрон. ресурс]. – 2022. – № 6. – P. 1–16. – Режим доступа: <https://doi.org/10.3390/soilsystems6040081>, свободный.
- Saccone P., Morin S., Baptist F., Bonneville J.M., Colace M.P., Domine F., Faure M., Geremia R., Locht J., Poly F. The effects of snowpack properties and plant strategies on litter decomposition during winter in Supalpine Meadows // *Plant and Soil*. – 2013. – № 363. – P. 215–229.
- Tuomi M., Thum T., Jarvinen H., Fronzek S., Berg B., Harmon M., Trofymow J.A., Sevanto S., Liski J. Leaf litter decomposition estimates of global variability based on Yasso07 model // *Ecological Modelling*. – 2009. – № 220. – P. 3362–3371.

- Tuomi M., Vahna P., Karhu K., Fritze H., Liski J. Heterotrophic soil respiration-comparison of different models describing its temperature dependence // *Ecological Modelling*. – 2008. – № 211. – P. 182–190.
- 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 // *Biology and Fertility of Soils*. – 2007. – № 44. – P. 103–112.
- Zhang M., Cheng X., Geng Q., Shu Z., Luo Y., Xu X. Leaf litter traits predominantly control litter decomposition in streams worldwide // *Global Ecology and Biogeography*. – 2019. – № 28. – P. 1469–1486.
- 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 // *Applied Soil Ecology*. – 2018. – № 128. – P. 35–42.

REFERENCES

- Adair E.C., Parton W.J., Del Grosso S.J., Silver W.L., Harmon M.E., Hall S.A., Burke I.C., Hart S.C. Simple three-pool model accurately describes patterns of long-term litter decomposition in diverse climates. *Global Change Biology*, 2008, no. 14, pp. 2636–2660.
- Bradford M.A., Wieder W.R., Bonan G.B., Fierer N., Raymond P.A., Crowther T.W. Managing uncertainty in soil carbon feedbacks to climate change. *Nature Climate Change*, 2016, no. 6, pp. 751–758.
- Cai A., Liang G., Yang W., Zhu J., Han T., Zhang W., Xu M. Patterns and driving factors of litter decomposition across Chinese terrestrial ecosystems. *Journal of Cleaner Production*, 2021, no. 278, pp. 123964.
- Cornwell W.K., Cornelissen J.H.C., Amatangelo K., Dorrepaal E., Eviner V.T., Godoy O., Hobbie S.E., Hoorens B., Kurokawa H., Perez-Harguindeguy N. Plant Species traits are the predominant control on litter decomposition rates within biomes worldwide. *Ecology Letters*, 2008, no. 11, pp. 1065–1071.
- El'sgol'ts L.Ye. *Differentsifl'nyye uravneniya i variatsionnoye ischisleniye* [Differential Equations and Variational Calculations]. Moscow, Nauka Publ., 1974, 432 p. (In Russ.)
- 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 Biology and Biochemistry*, 2015, no. 80, pp. 156–166.
- He X., Lin Y., Han G., Guo P., Tian X. The effect of temperature on decomposition of leaf litter from two tropical forests by a microcosm experiment. *European Journal Soil Biology*, 2010, no. 46, pp. 200–207.
- 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.
- Meentemeyer V. Macroclimate and lignin control of litter decomposition rates. *Ecology*, 1978, no. 59, pp. 465–472.
- Parton W.J., Schimel D.S., Cole C.V., Ojima D.S. Analysis of factors control-ling soil organic levels of grasslands in the Great Plains. *Soil Science Society of America Journal*, 1987, no. 51, pp. 1173–1179.
- Petraglia A., Cacciatori C., Chelli S., Fenu G., Calderisi G., Gargano D., Abeli T., Orsenigo S., Carbognani M. Litter decomposition effects of temperature driven by soil moisture and vegetation type. *Plant and Soil*, 2019, no. 435, pp. 187–200.
- 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 Systems*, 2022, no. 6, pp. 1–16. Available at: <https://doi.org/10.3390/soilsystems6040081>.
- Saccone P., Morin S., Baptist F., Bonneville J.M., Colace M.P., Domine F., Faure M., Geremia R., Lochet J., Poly F. The effects of snowpack properties and plant strategies on litter decomposition during winter in Supalpine Meadows. *Plant and Soil*, 2013, no. 363, pp. 215–229.
- Tuomi M., Thum T., Jarvinen H., Fronzek S., Berg B., Harmon M., Trofymow J.A., Sevanto S., Liski J. Leaf litter decomposition-estimates of global variability based on Yasso07 model. *Ecological Modelling*, 2009, no. 220, pp. 3362–3371.

- Tuomi M., Vahna P., Karhu K., Fritze H., Liski J. Heterotrophic soil respiration-comparison of different models describing its temperature dependence. *Ecological Modelling*, 2008, no.211, pp. 182–190.
- 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. *Biology and Fertility of Soils*, 2007, no. 44, pp. 103–112.
- Zhang M., Cheng X., Geng Q., Shu Z., Luo Y., Xu X. Leaf litter traits predominantly control litter decomposition in streams worldwide. *Global Ecology and Biogeography*, 2019, no.28, pp. 1469–1486.
- 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. *Applied Soil Ecology*, 2018, no. 128, pp. 35–42.