

ОЦЕНКА ПОКАЗАТЕЛЕЙ СКОРОСТИ РАЗЛОЖЕНИЯ ЛЕСНОЙ ПОДСТИЛКИ

Т. М. Тахмазов

Национальное аэрокосмическое агентство
Азербайджанская Республика, г. Баку

Статья посвящена оценке функциональных показателей разложения подстилки на лесных участках. Лесная подстилка оказывает влияние на такие процессы, как поступление питательных веществ, формирование гумуса, накопление углерода, частотность появления возгорания. Годовая динамика подстилки характеризуется увеличением его количества к концу сухого периода и тесно связана с дождевым сезоном. Основными факторами, влияющими на процесс разложения подстилки в лесах являются температура и влагосодержание, а также различные микроорганизмы. Разложение подстилки в лесу является важным фактором переноса CO_2 из леса в атмосферу. Очевидно, что такая зависимость скорости выделения CO_2 приводит к сезонно-зависимой оценки величины выделяемого CO_2 в лесах. Вместе с тем, существуют усредненные модельные оценки разложения массы подстилки в лесах за год. Плотность дерева отрицательно влияет на скорость выделения CO_2 при разложении древесной массы. С учетом вышеизложенного рассмотрен вопрос об усредненной оценке скорости выделения CO_2 из подстилки на лесных участках, где меры по сбору и обработке подстилки не осуществляются.

Исследованы два вопроса: (а) вопрос о наличии такой оптимальной функциональной зависимости скорости экспоненциального разложения подстилки от ее исходной массы при которой, суммарная оставшаяся масса подстилки достигает минимального значения. Показано существование такой оптимальной скорости, которая прямо пропорциональна логарифму исходной массы подстилки. Также исследован вопрос о зависимости скорости выделения CO_2 при разложении подстилки от исходной массы подстилки. Проведенный анализ показал, что при выше рассмотренном оптимальном режиме такая зависимость отсутствует.

Ключевые слова: подстилка, лес, разложение, оптимизация, лесная экосистема.

Conifers of the boreal area. 2023, Vol. XLI, No. 4, P. 325–328

ASSESSMENT OF INDICATORS FOR THE DECOMPOSITION RATE OF FOREST LITTER

T. M. Tahmazov

National Aerospace Agency
Baku, Republic of Azerbaijan

The article is devoted to the assessment of functional indicators of litter decomposition in forest areas. Forest litter influences processes such as the intake of nutrients, the formation of humus, carbon accumulation, and the frequency of ignition. The annual dynamics of litter is characterized by an increase in its quantity by the end of the dry period and is closely related to the rainy season. The main factors affecting the decomposition of litter in forests are temperature and moisture content, as well as various microorganisms. The decomposition of litter in the forest is an important factor in the transport of CO_2 from the forest into the atmosphere. It is obvious that this dependence of the CO_2 release rate leads to a seasonally dependent estimate of the amount of CO_2 released in forests. At the same time, there are averaged model estimates of the decomposition of litter mass in forests per year. The density of wood negatively affects the rate of CO_2 release during the decomposition of wood pulp. Taking into account the above, the issue of an average estimate of the rate of CO_2 release from litter in forest areas where litter collection and processing measures are not carried out is considered.

Two questions are investigated: (a) the question of the existence of such an optimal functional dependence of the exponential decomposition rate of the litter on its initial mass at which the total remaining mass of the litter reaches a minimum value. The existence of such an optimal velocity is shown, which is directly proportional to the logarithm of the initial mass of the litter. The question of the dependence of the CO_2 release rate during the decomposition of the litter on the initial mass of the litter is also investigated. The analysis showed that there is no such dependence in the above optimal mode.

Keywords: litter, forest, decomposition, optimization, forest ecosystem.

ВВЕДЕНИЕ

Хорошо известно, что лесная подстилка является важной компонентой лесной экосистемы. Лесная подстилка оказывает влияние на такие процессы, как по-

ступление питательных веществ, формирование гумуса, накопление углерода, частотность появления возгорания. Вместе с тем, динамика разложения лесной подстилки еще не до конца изучена [1; 2].

Согласно [3], пик количества подстилки попадает на август–октябрь, однако с увеличением высоты расположения лесного участка наблюдается снижение уровня этого пика. Годовая динамика подстилки характеризуется увеличением его количества к концу сухого периода и тесно связана с дождевым сезоном. Как отмечается в работе [4], подстилка и дальнейшее разложение являются важнейшим фактором возврата питательных веществ к растительности. При этом, большая концентрация питательных веществ в листьях в конечном счете приводит к увеличению поступления в почву этих веществ. Как отмечается в работе [5], исследование трех типов леса (лес, состоящий из камфоры; лес, состоящий из сосновых деревьев; лес, состоящий из камфоры и сосны) показало, что листья составляют около 71 % всей подстилки, количество макропитательных веществ соответствует отношению $N > Ca > K > Mg > P$. При этом скорость разложения листьев выше, чем у других компонентах опада. Следовательно, увеличение процента лиственных деревьев в лесах может привести к повышению питательности почвы. Указанная мысль также подтверждается в работе [6]. Согласно [6], по интенсивности разложения составных частей подстилки выявлена следующая закономерность: листья березы > листья брусники > хвоя сосны > мхи > ветви > кора. При этом, по скорости разложения листовой подгоризонт занимает первое место.

В целом, согласно [7], общий запас углерода в лесной подстилке в глобальном масштабе составляет $73 \cdot 10^{15}$ гр. При этом скорость разложения массы подстилки в лесах составляет $2 \div 11 \cdot 10^{15}$ гр/год [8].

Основными факторами, влияющими на процесс разложения подстилки в лесах являются температура и влагосодержание [9–11], а также различные микроорганизмы [12].

Разложение подстилки в лесу является важным фактором переноса CO_2 из леса в атмосферу. Как отмечается в [1], скорость выделения CO_2 в холодные и сухие сезоны года оказывается минимальной и с ростом температуры и влажности сильно растёт.

Очевидно, что такая зависимость скорости выделения CO_2 приводит к сезонно-зависимой оценке величины выделяемого CO_2 в лесах. Вместе с тем, существуют усредненные модельные оценки разложения массы подстилки в лесах за год. Согласно [1], плотность дерева отрицательно влияет на скорость выделения CO_2 при разложении древесной массы. С учетом вышеизложенного рассмотрим вопрос об усредненной оценке скорости выделения CO_2 из подстилки на лесных участках, где меры по сбору и обработке подстилки не осуществляются.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Согласно [1], скорость выделения CO_2 , обратно пропорционально оставшейся древесной массе подстилки:

$$R_{CO_2} = \frac{1000 \cdot \Delta CO_2 \cdot P(V - V_s)}{24 \cdot R(T_s + 273) \cdot W_c}, \quad (1)$$

где ΔCO_2 – изменение концентрации CO_2 (ppm/день); P – внутреннее давление (кПа); V – объем исследуемого образца подстилки; T_s – температура исследуемого образца подстилки ($^{\circ}C$); W_c – количество углерода, равная половине сухого веса подстилки, т. е. неразложившейся части исследуемого образца подстилки.

Согласно [13], неразложившаяся часть, в процессе декомпозиции (W_c) может быть аппроксимирована экспоненциальным законом в виде

$$W_c = W_0 \cdot \exp(-at), \quad (2)$$

где W_0 – исходная масса подстилки; a – скорость разложения.

При этом, согласно [13] скорость разложения может быть как линейной, так и нелинейной функцией W_0 .

Таким образом, выражение (2) может быть записано в следующем виде

$$W_c = W_0 \cdot \exp[-a(W_0) \cdot t], \quad (3)$$

Задачу исследования сформулируем следующим образом. Допустим, что весь лесной участок можно разбить на равные подучастки в количестве n , где показатели W_{0i} ; $i = \overline{1, n}$ составляют упорядоченное множество

$$W_0 = \{W_{0i}\}, \quad (4)$$

где $W_{0,i} = W_{0,i-1} + \Delta W_0$; $\Delta W_0 = \text{const}$, $W_{0,0} = 0$.

С учетом (3) и (4) среднюю величину W_c по всем подучасткам определим как

$$W_{c, \text{ср}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n W_{0,i} \exp[-a(W_{0i}) \cdot t]. \quad (5)$$

Далее допустим, что

$$\sum_{i=1}^n a(W_{0,i}) = \text{const}. \quad (6)$$

Условие (6) имеет физический смысл, заключающийся в нормированности тех, факторов, которые оказывают влияние на скорость разложения по всем рассматриваемым подучасткам леса.

Если дискретные модели (5) и (6) условно аппроксимировать непрерывными моделями то получим

$$W_{0, \text{ср.н}} = \frac{1}{W_{0, \text{max}}} \int_0^{W_{0, \text{max}}} W_0 \cdot \exp[-a(W_0)t] dW_0, \quad (7)$$

где $W_{0, \text{ср.н}}$ – нормированная усредненная величина оставшейся массы подстилки после разложения в течение времени t ,

$$\int_0^{W_{0, \text{max}}} a(W_0) dW_0 = C; \quad C = \text{const}. \quad (8)$$

На базе (7) и (8) составим задачу безусловной вариационной оптимизации целевой функционал F которой имеет вид

$$F = \frac{1}{W_{0,\max}} \int_0^{W_{0,\max}} W_0 \cdot \exp[-a(W_0)t] dW_0 + \lambda \left[\int_0^{W_{0,\max}} a(W_0) dW_0 - C \right]. \quad (9)$$

Решение задачи (9) позволит определить, при каком виде функции $a(W_0)$ нормированная усредненная величина оставшейся массы подстилки после разложения в течение времени t достигнет экстремального значения, а также тип этого экстремума (максимум или минимум).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Решение задачи (9) согласно [14] должна удовлетворять условию

$$\frac{d\{W_0 \cdot \exp[-a(W_0)t] + \lambda a(W_0)\}}{da(W_0)} = 0. \quad (10)$$

Из условия (10) получим

$$-W_0 t \cdot \exp[-a(W_0)t] + \lambda = 0. \quad (11)$$

Из (11) имеем

$$a(W_0) = \frac{1}{t} \ln(t/\lambda). \quad (12)$$

Таким образом, при $t, \lambda = \text{const}$, экстремум F может появиться при логарифмической зависимости a от W_0 .

Проанализируем тип экстремума F_1 , является ли этот экстремум минимумом или максимумом. Согласно [14], для этого следует вычислить вторую производную подынтегрального выражения в (9) от $a(W_0)$.

Имеем

$$\begin{aligned} \frac{d^2\{W_0 \exp[-a(W_0)t] + \lambda a(W_0)\}}{da(W_0)} &= \\ &= t^2 W_0 \exp[-a(W_0)t]. \end{aligned} \quad (13)$$

Как видно из (13) указанная вторая производная всегда является положительной величиной и следовательно экстремум является минимумом. Таким образом, при логарифмической зависимости скорости разложения от исходной массы подстилки количество оставшейся массы подстилки во всем лесном участке достигает минимума.

Теперь проанализируем следующий вопрос: Как повлияет вычисленное оптимальное решение (12) на величину скорости выделения CO_2 при декомпозиции подстилки.

С учетом (2) и (12) получим

$$R_{\text{CO}_2} = \frac{2000 \cdot \Delta \text{CO}_2 \cdot P(V - V_s) \cdot \exp[a(W_0)t]}{24 \cdot R(T_s + 273) \cdot W_0}. \quad (14)$$

С учетом (14) и (12) получим

$$R_{\text{CO}_2} = \frac{1000 \cdot \Delta \text{CO}_2 \cdot P(V - V_s)t}{\lambda \cdot 24 \cdot R(T_s + 273)}. \quad (15)$$

Таким образом, как видно из (5) при условии (12) скорость выделения CO_2 в оптимальном режиме не зависит от величины W_0 .

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, проанализирован вопрос об оценке основных показателей процесса разложения лесной подстилки. Исследованы два вопроса:

1. Существует ли такая оптимальная функциональная зависимость скорости экспоненциального разложения подстилки от ее исходной массы при которой, с учетом наложенного ограничительного условия на сумму таких скоростей по всем подучасткам леса, суммарная оставшаяся масса подстилки достигает минимального значения. Получен положительный ответ на этот вопрос, согласно которому такая оптимальная скорость прямо пропорциональна логарифму исходной массы подстилки.

2. Зависит ли скорость выделения CO_2 при разложении подстилки от исходной массы подстилки.

Проведенный анализ показал, что вышепересмотренном оптимальном режиме такая зависимость отсутствует.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. Liu W., Schaefer D., Qiao L., Liu X. What controls the variability of wood-decay rates?// Forest ecology and management. 2013. Pp. 623–631.
2. Paletto A., Ferretti F., De Meo I., Cantiani P., Focacci M. Ecological and environmental role of deadwood in managed and unmanaged forests// Sustainable forest management – current research. Pp. 219–238. 2012.
3. Becker J., Pabst H., Mnyonga J., Kuzyakov Y. Annual litterfall dynamics and nutrient deposition depending on elevation and land use at Mt. Kilimanjaro// Biogeosciences. 12. Pp. 5635–5646. 2015.
4. Staelens J., Nachtergale L., Schrijver A. D., Vanhellemont M., Wuyts K., Verheyen K. Spatio-temporal litterfall dynamics in a 60-year-old mixed deciduous forest// Annals of forest science. Pp. 89–98. 2011.
5. Farooq T. H., Li Z., Yan W., Shakoar A., Kumar U., Shabbir R., Peng Y., Gayathiri E., Alotaibi SS., Wrobel J., Chen X. Variations in litterfall dynamics. C:N:P Stoichiometry and associated nutrient return in pure and mixed stands of camphor tree and masson pine forests// Front Environ. Sci. 10:903039. doi:10.3389/fenvs.2022.903039.
6. Лиханова Н. В. Роль растительного опада в формировании лесной подстилки на вырубках ельников средней тайги. <https://cyberleninka.ru/article/n/rol-rastitelnogo-opada-v-formirovanii-lesnoy-podstilki-na-vyrubkah-elnikov-sredney-taygi>.
7. Pan Y., Birdsey R. A., Fang J. Y., Houghton R., Kauppi P. E., Kurz W. A., Phillips O. L., Shvidenoko A., Lewis S. L., Canadell J. G., Ciais P., Jackson R. B.,

Pacala S. W., Piao S. L., Rautiainen A., Sitch S., Hayes D. A large and carbon sink in the world's forests// *Science* 333. Pp. 988-993. 2011.

8. Quere C. The global carbon budget 1959-2011. *Earth Syst. Sci. Data Disc* 5. Pp. 1107-1157. 2012.

9. Jomura M., Kominami Y., Dannoura M., Kanazawa Y. Spatial variation in respiration from coarse woody debris in a temperature secondary broad-leaved forest in Japan// *Forest Ecol. Manage.* 255. Pp. 149-155. 2008.

10. Liu W. H., Bryant D. M., Hutyra L. R., Saleska S. R., Hammond-Pyle E., Curran D., Wofsy S. C. Woody debris contribution to the carbon budget of selectively logged and maturing mid-latitude forests// *Oecologia* 148. Pp. 108-117. 2006.

11. Remsburg A. J., Turner M. G. Amount, position and age of coarse wood influence litter decomposition in postfire// *Pinus contorta* stands. *Forest Res.* 36. Pp. 2112-2123. 2006.

12. Persson Y., Ihrmark K., Stenlid J. Do bark beetles facilitate the establishment of rot fungi in Norway spruce?// *Fungal ecol.* 4. Pp. 262-269. 2011.

13. Adair E. C., Hobbie S. E., Hobbie R. K. Single-pool exponential decomposition models: potential pitfalls in their use in ecological studies// *Ecology*. 9(14). Pp. 1225-1236. 2010.

14. Эльсгольц Л. Е. Дифференциальные уравнения и вариационное исчисление// *М. Наука*. 1974. С. 432.

REFERENCES

1. Liu W., Schaefer D., Qiao L., Liu X. What controls the variability of wood-decay rates?// *Forest ecology and management*. 2013. Pp. 623-631.

2. Paletto A., Ferretti F., De Meo I., Cantiani P., Focacci M. Ecological and environmental role of deadwood in managed and unmanaged forests // *Sustainable forest management – current research*. Pp. 219-238. 2012.

3. Becker J., Pabst H., Mnyonga J., Kuzyakov Y. Annual litterfall dynamics and nutrient deposition depending on elevation and land use at Mt. Kilimanjaro// *Biogeosciences*. 12. Pp. 5635-5646. 2015.

4. Staelens J., Nachtergale L., Schrijver A. D., Vanhellemont M., Wuyts K., Verheyen K. Spatio-temporal litterfall dynamics in a 60-year-old mixed deciduous forest// *Annals of forest science*. Pp. 89-98. 2011.

5. Farooq T. H., Li Z., Yan W., Shakoob A., Kumar U., Shabbir R., Peng Y., Gayathiri E., Alotaibi SS., Wrobel J., Chen X. Variations in litterfall dynamics. C:N:P Stoichiometry and associated nutrient return in pure and mixed stands of camphor tree and masson pine forests// *Front Environ. Sci.* 10:903039. doi:10.3389/fenvs.2022.903039.

6. Likhanova N.V. The role of plant litter in the formation of forest litter in the felling of spruce forests of the middle taiga. <https://Cyberleninka.Ru/Article/N/Rol-Rastitelnogo-Opada-V-Formirovanii-Lesnoy-Podstilki-Na-Vyrubkah-Elnikov-Sredney-Taygi> (In Russ.)

7. Pan Y., Birdsey R. A., Fang J. Y., Houghton R., Kauppi P. E., Kurz W. A., Phillips O. L., Shvidenoko A., Lewis S. L., Canadell J. G., Ciais P., Jackson R. B., Pacala S. W., Piao S. L., Rautiainen A., Sitch S., Hayes D. A large and carbon sink in the world's forests// *Science* 333. Pp. 988-993. 2011.

8. Quere C. The global carbon budget 1959-2011. *Earth Syst. Sci. Data Disc* 5. Pp. 1107-1157. 2012.

9. Jomura M., Kominami Y., Dannoura M., Kanazawa Y. Spatial variation in respiration from coarse woody debris in a temperature secondary broad-leaved forest in Japan// *Forest Ecol. Manage.* 255. Pp. 149-155. 2008.

10. Liu W. H., Bryant D. M., Hutyra L. R., Saleska S. R., Hammond-Pyle E., Curran D., Wofsy S. C. Woody debris contribution to the carbon budget of selectively logged and maturing mid-latitude forests// *Oecologia* 148. Pp. 108-117. 2006.

11. Remsburg A. J., Turner M. G. Amount, position and age of coarse wood influence litter decomposition in postfire// *Pinus contorta* stands. *Forest Res.* 36. Pp. 2112-2123. 2006.

12. Persson Y., Ihrmark K., Stenlid J. Do bark beetles facilitate the establishment of rot fungi in Norway spruce?// *Fungal ecol.* 4. Pp. 262-269. 2011.

13. Adair E. C., Hobbie S. E., Hobbie R. K. Single-pool exponential decomposition models: potential pitfalls in their use in ecological studies// *Ecology*. 9(14). Pp. 1225-1236. 2010.

14. Elsholts L. E. Differential equations and calculus of variations // *М. : Nauka*. 1974. P. 432 (In Russ.).

© Тахмазов Т. М., 2023

Поступила в редакцию 10.03.2023
Принята к печати 14.07.2023