

ЭКОЛОГИЯ/ECOLOGY

DOI: <https://doi.org/10.60797/JAE.2026.65.6>

РАЗЛОЖЕНИЕ ОПАДА РАСТЕНИЙ ОЛИГОТРОФНЫХ БОЛОТ В МОДЕЛИРУЕМЫХ ГИДРОТЕРМИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ НА НАЧАЛЬНЫХ ЭТАПАХ ДЕСТРУКЦИИ

Научная статья

Никонова Л.Г.^{1,*}, Зубарева Ю.В.²

¹ ORCID : 0000-0003-1759-5082;

^{1,2} Институт мониторинга климатических и экологических систем Сибирского отделения Российской Академии наук, Томск, Российская Федерация

* Корреспондирующий автор (nikonovalilig[at]gmail.com)

Аннотация

Представлены результаты инкубационного эксперимента по влиянию температуры (2, 12, 22°C) и влажности (30, 60 и 90% полной влагоемкости, ПВ) на скорость разложения растительного опада основных растений болотных экосистем южно-таежной подзоны Западной Сибири (*Sphagnum fuscum*, *Chamaedaphne calyculata*, *Eriophorum vaginatum*, а также смешанных образцов) на начальных этапах разложения (1 месяц). Методом биокинетического фракционирования выявлено, что во всех образцах при снижении температуры при всех уровнях влажности зафиксировано снижение общих потерь углерода. При влажности 90% от полной влагоемкости образцов общие потери углерода не превышали 6,7% от исходного значения, при 60% — 5%, при 30 — 2,7%. Выявлен эффект смешивания растительного опада, который оказывает наибольшее влияние на среднюю скорость разложения при 12°C и 30% влажности, ускоряя разложение на 5,5–8,3 мкг С/г/час.

Ключевые слова: скорость деструкции, интенсивность выделения CO₂, *Sphagnum fuscum*, *Chamaedaphne calyculata*, *Eriophorum vaginatum*.

DECOMPOSITION OF OLIGOTROPHIC BOG PLANTS IN SIMULATED HYDROTHERMAL CONDITIONS AT THE INITIAL STAGES OF DESTRUCTION

Research article

Никонова Л.Г.^{1,*}, Зубарева Ю.В.²

¹ ORCID : 0000-0003-1759-5082;

^{1,2} Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems of the Siberian Branch of the Russian, Tomsk, Russian Federation, Tomsk, Russian Federation

* Corresponding author (nikonovalilig[at]gmail.com)

Abstract

The results of an incubation experiment on the effect of temperature (2, 12, 22°C) and humidity (30, 60 and 90% of maximum water capacity, MWC) on the rate of decomposition of plant litter from the main plants of marsh ecosystems in the southern taiga subzone of Western Siberia (*Sphagnum fuscum*, *Chamaedaphne calyculata*, *Eriophorum vaginatum*, as well as mixed samples) in the initial stages of decomposition (1 month). The method of biokinetic fractionation showed that in all samples, a decrease in total carbon losses was recorded at all humidity levels when the temperature decreased. At 90% of the samples' maximum water capacity, total carbon losses did not exceed 6.7% of the initial value, at 60% — 5%, and at 30% — 2.7%. The effect of mixing plant litter was identified, which has the greatest impact on the average decomposition rate at 12°C and 30% humidity, accelerating decomposition by 5.5–8.3 µg C/g/hour.

Keywords: rate of destruction, intensity of CO₂ release, *Sphagnum fuscum*, *Chamaedaphne calyculata*, *Eriophorum vaginatum*.

Введение

Болота играют климатообразующую, средообразующую роль, являются пулом углерода, накопленного в виде органического вещества торфа, а также считаются стратегическим источником больших запасов пресной воды [1], [2], [3]. Болотные экосистемы играют важную роль в глобальном цикле органического углерода из-за преобладания процессов продукции (накопления органического вещества в растительных тканях и образование торфяных отложений) над деструкцией (распадом органического вещества в растительных остатках). Это приводит к накоплению огромных запасов органического вещества в болотах по всему миру [4]. Интенсивность процессов разложения растительных остатков в значительной степени определяется гидротермическим режимом торфяной залежи [5], [6]. Наряду с влиянием абиотических факторов, таких как температура и влажность скорость деструкции растительных остатков в болотных экосистемах также определяется индивидуальными особенностями химического состава самих растений-торфообразователей [6], [7]. В естественных условиях вышеупомянутые факторы, оказывают совокупное влияние на скорость разложения растительных остатков. В связи с этим исследования, направленные на выявление вклада факторов в процесс разложения в контролируемых условиях модельного эксперимента, являются достаточно важными. Основная цель исследования заключалась в количественной оценке влияния температуры и влажности на начальную скорость разложения растительного опада олиготрофных болот южно-таежной подзоны Западной Сибири в условиях модельного эксперимента.

Методы и принципы исследования

В 2024 году, в лабораторных условиях, проведен модельный эксперимент на основе метода биокинетического фракционирования [9], [10], в котором исследовали скорость разложения 6 видов растительных образцов: *Sphagnum fuscum*, *Chamaedaphne calyculata*, *Eriophorum vaginatum*, также, участвовали в эксперименте смешанные образцы состоящие из растительного опада в соответствии с долей каждого вида в типичном ряме — Mixed sample 1 (*S. fuscum* 60% + *Ch. calyculata* 40%), Mixed sample 2 (*S. fuscum* 90% + *E. vaginatum* 10%), Mixed sample 3 (*S. fuscum* 60% + *Ch. calyculata* 35% + *E. vaginatum* 5%).

Растительные образцы исходно обладали различным химическим составом (таблица 1). Наиболее благоприятными качествами для разложения, такими как высокое содержание углерода, азота, низкое соотношение C/N, высокая зольность и меньшая кислотность, обладали листья *Chamaedaphne calyculata*, близкими характеристиками также обладала ветошь *Eriophorum vaginatum*. Менее привлекательными характеристиками для микроорганизмов-деструкторов характеризовался очес *Sphagnum fuscum*. Среди смешанных образцов наиболее доступным, вероятно, являлся Mixed sample 3 (*S+Ch+E*), т.к. содержал больше всего зольных элементов и наименьшее значение C/N, а также создавал менее кислые условия согласно значению pH.

Таблица 1 - Некоторые свойства опада растений-торфообразователей

DOI: <https://doi.org/10.60797/JAE.2026.65.6.1>

Образец	Отн. в., %	ППВ, %	pH (H ₂ O)	A, %	C, %	N, %	C/N
<i>Sphagnum fuscum</i>	6,9	1745	2,8	1,1	45,5	0,9	51,5
<i>Chamaedaphne calyculata</i>	5,0	225	4,6	2,3	48,7	1,8	27,0
<i>Eriophorum vaginatum</i>	5,1	341	4,2	1,9	44,8	1,9	23,4
Mixed sample 1 (<i>S+Ch</i>)	6,6	1172	3,2	1,9	46,2	1,4	33,5
Mixed sample 2 (<i>S+E</i>)	6,5	1470	3,0	1,9	47,5	1,4	34,0
Mixed sample 3 (<i>S+Ch+E</i>)	5,8	736	3,6	2,0	45,7	1,5	31,1

Примечание: отн.в. – относительная влажность, ППВ – полная предельная влагоемкость, А – зольность, С, N – содержание общего азота и углерода

Флаконы с растительным опадом увлажняли болотной водой до состояния, соответствующего 90, 60 или 30% их полной влагоемкости, выдерживали 7 дней при комнатной температуре (предынкубация), а затем помещали в термостаты для последующего непрерывного инкубирования. Измерения проводили регулярно в течение 1 месяца. В день проведения замера флаконы извлекали из термостата, проветривали в течение 10 мин в токе воздуха, герметично закрывали резиновыми крышками и опять помещали в термостат. Спустя 3–4 часа проводили определение концентрации CO₂ с помощью проточного инфракрасного газоанализатора LI-8100A (Li-COR Biosciences, США). Между замерами флаконы закрывали полиэтиленовыми пленками, которые пропускали воздух, но существенно сдерживали испарение влаги.

Для определения интенсивности разложения — динамики скорости выделения С(CO₂) (decomposition rate, DecR, мкг С/г субстрата/час) использовали формулу [10], [11]:

$$DecR = \frac{dC \times M(C) \times V_f \times 10}{m \times V_m \times t} \quad (1)$$

где dC — показания прибора с учетом нулевого значения, объемные %;

M(C) — молярная масса углерода, 12 г/моль;

V_f — объем флакона, мл;

m — масса абсолютно сухого субстрата, г;

V_m — молярный объем газа, 22,4 л/моль;

t — время инкубации, час; 10 — переводной коэффициент.

Общие потери углерода из различных видов растительного опада при температурах (2, 12, 22 °C) и разных уровнях влажности (30, 60 и 90% их полной влагоемкости) рассчитывали на основе экспоненциальной регрессионной модели [12], [13]:

$$C_{cum} = C_o \times (1 - e(-k \times T)) \quad (2)$$

где C_{cum} — суммарные потери С(CO_2) в результате разложения растительного опада (мг С/г субстрата);
 C_0 — исходное содержание общего углерода в субстрате (мг С/г субстрата);
 T — время инкубации (сутки);
 k — константа разложения, сут $^{-1}$.

Результаты и обсуждение

Согласно средним значениям, полученным в течение месяца, вне зависимости от влажности и вида растительного опада для большинства исследуемых образцов при снижении температуры происходило замедление интенсивности разложения (Рисунок 1). Прямая зависимость интенсивности разложения (DecR) от влажности обнаружена лишь для образцов, заложенных при 12°C ($r=0,5$). Также, достаточно явно прослеживается прямая зависимость DecR ветоши *E. vaginatum* и от температуры, и от влажности. Самая высокая скорость разложения характерна для *Ch. calyculata* и *E. vaginatum*, в зависимости от температуры и уровня влажности в течение 1 месяца в среднем скорость разложения варьировала в пределах от 3,26 до 41,79 мкг С/г/час для листьев мирта и от 1,72 до 42,37 мкг С/г/час для ветоши пушкицы. Минимальные средние значения DecR были характерны для *S. fuscum*, от 1,37 до 18,07 мкг С/г/час.

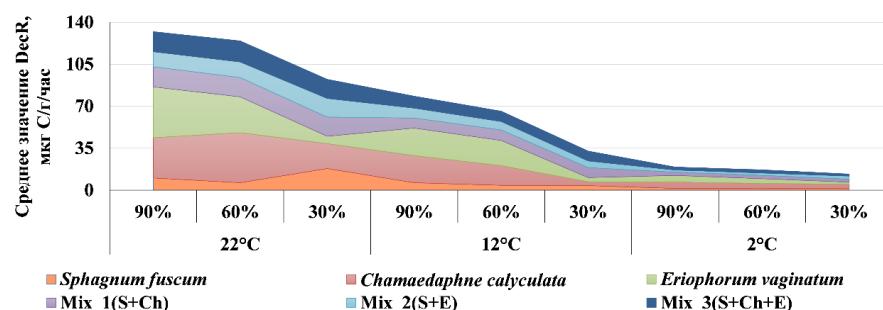


Рисунок 1 - Средняя скорость разложения (DecR) растительных образцов за 1 месяц при температуре 22, 12, 2 °C и разных уровнях влажности: 30, 60 и 90 % их полной влагоемкости

DOI: <https://doi.org/10.60797/JAE.2026.65.6.2>

Для смешанных образцов обнаружена значительная вариативность интенсивности выделения С(CO_2), колеблющаяся в среднем от 1,70 до 17,59 мкг С/г/час. При этом среди смешанных образцов для *Mixed sample 2* наблюдалась минимальная активность во всех экспериментальных условиях. Для всех смешанных образцов наблюдалось усиление скорости разложения при 12°C и 30% влажности по отношению к их отдельным компонентам, эффект смешивания повышал интенсивность разложения на 5,5–8,3 мкг С/г/час. Примечательно, что в условиях 30% влажности для *Mixed sample 1* при 22°C и *Mixed sample 3* при 2°C смешивание приводило к снижению скорости разложения относительно отдельных растительных образцов.

Период, в течение которого наблюдались самые высокие скорости разложения составлял первые 5 дней. При 22°C значение DecR достигало в зависимости от влажности 16–251 мкг С/г/час, а при 12 и 2°C максимальная скорость выделения С(CO_2) не превышала 95 и 37 мкг С/г/час соответственно. В дальнейшем, происходило постепенное снижение темпов разложения, за исключением образца *S. fuscum* при 22 °C и 30% влажности, для которого отмечено активное увеличение выделения CO_2 на 25-й день инкубации. Кроме того, для *E. vaginatum*, при влажности 60% и 90%, активное выделение углекислого газа наблюдалось несколько дольше, до 13 дня при температуре 22 °C, до 18 дня при 12 °C, и до конца месяца при 2 °C. Как правило, после активных всплесков выделения углекислого газа значения достигают определенного плато [14]. В нашем исследовании, в течение 31 дня относительно равномерного уровня выноса углерода достигли только образцы, инкубированные в условиях 22°C и влажности 60% от ПВ.

Снижение температуры и влажности, при которой проходила инкубация растительных образцов, как правило, вызывало уменьшение общих потерь С(CO_2) в процессе их разложения (Рисунок 2).

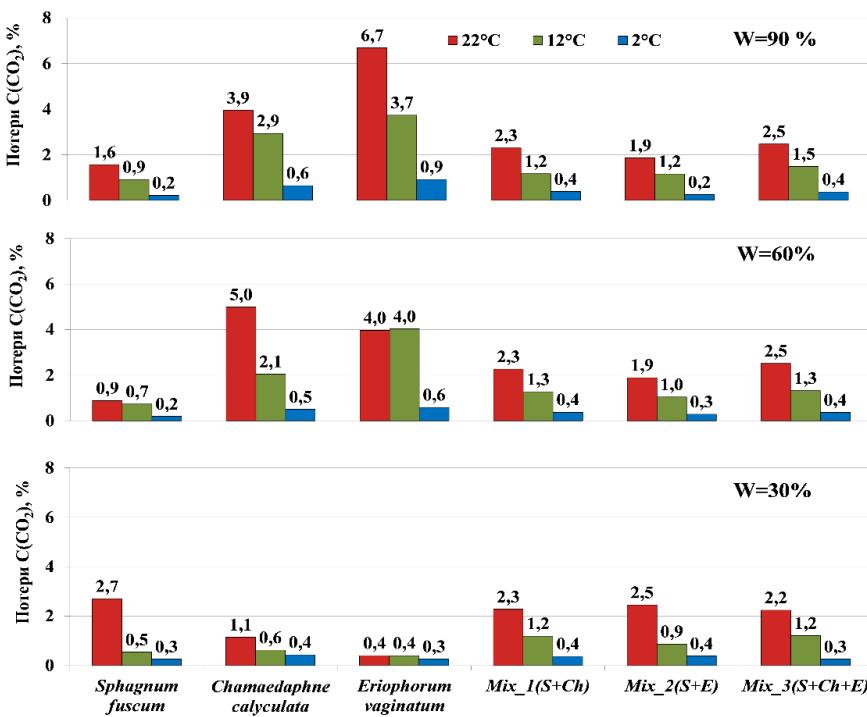


Рисунок 2 - Суммарные потери C(CO₂) за 30 дней из различных видов растительного опада при температурах (2, 12, 22 °C) и разных уровнях влажности (30, 60 и 90 % их полной влагоемкости)

DOI: <https://doi.org/10.60797/JAE.2026.65.6.3>

Примечание: % от исходного количества C в образце

При влажности 90% от полной влагоемкости образцов общие потери углерода не превышали 6,7% от исходного значения, при 60% — 5%, при 30 — 2,7%. Во всех образцах при снижении температуры с 22°C до 2°C при всех уровнях влажности зафиксировано снижение общих потерь углерода. Суммарное выделение C(CO₂) (C_{cum}) при 60 и 90% влажности было самым высоким из образцов *Ch. calyculata* и *E. vaginatum*, от 3,9 до 6,7% при температуре 22°C и снижаясь до 0,5–0,9% при температуре 2°C. Образцы *S. fuscum*, ожидаемо, демонстрировали самую высокую устойчивость к разложению, за исключением условий 22 °C и 30% влажности, при которых на очесах мха и смешанных образцах, в состав которых он входил, приходились максимальные потери органического вещества. При снижении температуры в смешанных образцах, так же прослеживалось снижение общих потерь углерода. В литературе встречается информация об интенсивном разложении опада на начальных этапах деструкции, однако в ходе последующего разложения, содержание легкодоступных компонентов углеводного и полипептидного комплексов убывает, и соответственно уменьшаются потери органического вещества [15], [16], [17], [18].

Заключение

Таким образом, в экспериментальных условиях установлено, что для болотных растений, на начальных этапах деструкции наблюдается интенсивное выделение C(CO₂), с максимальной активностью в течение первых 5 дней. Для *Sphagnum fuscum* в условиях инкубации при 22°C и 30% влажности пик интенсивности разложения приходится лишь на 25-е сутки. Снижение температуры инкубирования и влажности вызывает не только закономерное уменьшение максимальных значений DecR, но и для некоторых образцов удлинение периода с наиболее высокой скоростью разложения, например для *Eriophorum vaginatum*. Во всех образцах при снижении температуры с 22°C до 2°C при всех уровнях влажности зафиксировано снижение общих потерь углерода. Эффект смешивания растительного опада оказывает наибольшее влияние на среднюю скорость разложения при 12°C и 30% влажности, ускоряя разложение на 5,5–8,3 мкг C/г/час.

Финансирование

Работа выполнена в рамках государственного задания FWRG-2025-0002.

Конфликт интересов

Не указан.

Рецензия

Ельшаева И.В., Санкт-Петербургский государственный аграрный университет, Санкт-Петербург Российская Федерация

DOI: <https://doi.org/10.60797/JAE.2026.65.6.4>

Funding

The work was carried out as part of state assignment FWRG-2025-0002.

Conflict of Interest

None declared.

Review

Elshaeva I.V., St. Petersburg State Agrarian University, Saint-Petersburg Russian Federation
DOI: <https://doi.org/10.60797/JAE.2026.65.6.4>

Список литературы / References

1. Семенова Н.М. О сохранении ландшафтов большого Васюганского болота / Н.М. Семенова, В.И. Валуцкий, С.П. Гуреев [и др.] // Чтения памяти Ю. А. Львова: II Межрегиональная экологическая конференция. — Томск, 1998. — С. 77–78.
2. Gorham E. Northern peatlands: role in the carbon cycle and probable responses to climatic warming / E. Gorham // Ecological Applications. — 1991. — Vol. 1. — № 2. — P. 182–195.
3. Vompersky S.E. The role of marshes in the carbon cycle. Biogeocenotic features of bogs and their rational use / S.E. Vompersky // Nauka. — 1994. — P. 5–37.
4. Инишева Л.И. Торфяные ресурсы и их характеристика / Л.И. Инишева // Болота Западной Сибири и их роль в Биосфере / Под ред. А.А. Земцова. — Томск: Изд-во ТГУ, 2000. — 72 с.
5. Guo X. Influence of environment and substrate quality on the decomposition of wetland plant root in the Sanjiang Plain, Northeast China / X. Guo, X. Lu, S. Tong [et al.] // Journal of Environmental Sciences. — 2008. — Vol. 20. — P. 1445–1452.
6. Peltoniemi K. How water-level drawdown modified litter-decomposing fungal and actinobacterial communities in boreal peatlands / K. Peltoniemi, P. Strakova, H. Fritze [et al.] // Soil Biology and Biochemistry. — 2012. — Vol. 51. — P. 20–34.
7. Головацкая Е.А. Влияние уровня болотных вод на процессы трансформации сфагновых мхов в торфяной почве олиготрофных болот / Е.А. Головацкая, Л.Г. Никонова // Почвоведение. — 2017. — № 5. — С. 603–613.
8. Ларионова А.А. Оценка устойчивости почвенного органического вещества на основе различных видов фракционирования и изотопных методов / А.А. Ларионова, Б.Н. Золотарева, А.К. Квиткина [и др.] // Почвоведение. — 2015. — № 2. — С. 175.
9. Семенов В.М. Пулы и фракции органического углерода в почве: структура, функции и методы определения / В.М. Семенов, Т.Н. Лебедева, В.О. Лопес Де Гереню [и др.] // Почвы и окружающая среда. — 2023. — № 1. — С. 1–16.
10. Kurganova I.N. Evaluation of the rates of soil organic matter mineralization in forest ecosystems of temperate continental, mediterranean, and tropical monsoon climates / I.N. Kurganova, V.O. Lopes de Gerenuy, J.F. Gallardo Lancho [et al.] // Eurasian Soil Science. — 2012. — Vol. 45. — № 1. — P. 68–79.
11. Kurganova I. Coupled effect of temperature and mineral additions facilitates decay of aspen bark / I. Kurganova, V. Lopes de Gerenuy, N. Galibina [et al.] // Geoderma. — 2018. — Vol. 316. — P. 27–37.
12. Olson J.S. Energy storage and the balance of producers and decomposers in ecological systems / J.S. Olson // Ecology. — 1963. — Vol. 44. — № 2. — P. 322–331.
13. Berg B. Decomposition patterns for foliar litter: A theory for influencing factors / B. Berg // Soil Biology and Biochemistry. — 2014. — Vol. 78. — P. 222–232.
14. Nikonova L. Impact of Temperature and Moisture on the Decomposition of Peat-Forming Plants: Results of a Two-Year Incubation Experiment / L. Nikonova, I. Kurganova, V. Lopes de Gerenuy [et al.] // Forests. — 2023. — Vol. 14. — № 12. — P. 2355.
15. Функционирование микробных комплексов в верховых торфяниках — анализ причин медленной деструкции торфа: монография / Под ред. И.Ю. Чернова. — Москва: Товарищество научных изданий КМК, 2013. — 128 с.
16. Fioretto A. Lignin and cellulose degradation and nitrogen dynamics during decomposition of three leaf litter species in a Mediterranean ecosystem / A. Fioretto, C. Di Nardo, S. Papa [et al.] // Soil Biology and Biochemistry. — 2005. — Vol. 37. — № 7. — P. 1083–1091.
17. Бамбалов Н.Н. Превращение отмерших растений в болотных биогеоценозах / Н.Н. Бамбалов, А.В. Хоружик, Е.С. Лукошко [и др.] // Эксперимент и математическое моделирование в изучении биогеоценозов лесов и болот / Под ред. В.П Стригуцкого, Н.Н Бамбалова. — Москва: Наука, 1990. — С. 53–63.
18. Hajek T. Habitat and species controls on Sphagnum production and decomposition in a mountain bog / T. Hajek // Boreal Environmental Research. — 2009. — № 14. — P. 947–958.

Список литературы на английском языке / References in English

1. Semenova N.M. O sokhranenii landshaftov bolshogo Vasyuganskogo bolota [On the preservation of landscapes of the Great Vasyugan Swamp] / N.M. Semenova, V.I. Valutskii, S.P. Gureev [et al.] // Chteniya pamyati Yu. A. Lvova: II Mezhregionalnaya ekologicheskaya konferentsiya [Proceedings of the II Interregional Ecological Conference in Memory of Yu.A. Lvov]. — Tomsk, 1998. — P. 77–78. [in Russian]
2. Gorham E. Northern peatlands: role in the carbon cycle and probable responses to climatic warming / E. Gorham // Ecological Applications. — 1991. — Vol. 1. — № 2. — P. 182–195.
3. Vompersky S.E. The role of marshes in the carbon cycle. Biogeocenotic features of bogs and their rational use / S.E. Vompersky // Nauka. — 1994. — P. 5–37.
4. Inisheva L.I. Torfyanie resursi i ikh kharakteristika [Peat resources and their characteristics] / L.I. Inisheva // Bolota Zapadnoi Sibiri i ikh rol v Biosfere [The Bogs of Western Siberia and Their Role in the Biosphere] / Ed. by A.A. Zemtsov. — Tomsk: Publishing House of Tomsk State University, 2000. — 72 p. [in Russian]
5. Guo X. Influence of environment and substrate quality on the decomposition of wetland plant root in the Sanjiang Plain, Northeast China / X. Guo, X. Lu, S. Tong [et al.] // Journal of Environmental Sciences. — 2008. — Vol. 20. — P. 1445–1452.
6. Peltoniemi K. How water-level drawdown modified litter-decomposing fungal and actinobacterial communities in boreal peatlands / K. Peltoniemi, P. Strakova, H. Fritze [et al.] // Soil Biology and Biochemistry. — 2012. — Vol. 51. — P. 20–34.

7. Golovatskaya Ye.A. Vliyanie urovnya bolotnikh vod na protsessi transformatsii sfagnovikh mkhov v torfyanoi pochve oligotrofnikh bolot [Influence of water level on the transformation processes of Sphagnum mosses in peat soil of oligotrophic bogs] / Ye.A. Golovatskaya, L.G. Nikonova // Pochvovedenie [Soil Science]. — 2017. — № 5. — P. 603–613. [in Russian]
8. Larionova A.A. Otsenka ustoychivosti pochvennogo organicheskogo veshchestva na osnove razlichnykh vidov fraktsionirovaniya i izotopnikh metodov [Assessment of the stability of soil organic matter based on various fractionation and isotopic methods] / A.A. Larionova, B.N. Zolotareva, A.K. Kvitkina [et al.] // Pochvovedenie [Soil Science]. — 2015. — № 2. — P. 175. [in Russian]
9. Semenov V.M. Puli i fraktsii organicheskogo ugleroda v pochve: struktura, funktsii i metodi opredeleniya [Pools and fractions of organic carbon in soil: structure, functions, and methods of determination] / V.M. Semenov, T.N. Lebedeva, V.O. Lopes De Gerenuy [et al.] // Pochvi i okruzhayushchaya sreda [Soils and Environment]. — 2023. — № 1. — P. 1–16. [in Russian]
10. Kurganova I.N. Evaluation of the rates of soil organic matter mineralization in forest ecosystems of temperate continental, mediterranean, and tropical monsoon climates / I.N. Kurganova, V.O. Lopes de Gerenuy, J.F. Gallardo Lancho [et al.] // Eurasian Soil Science. — 2012. — Vol. 45. — № 1. — P. 68–79.
11. Kurganova I. Coupled effect of temperature and mineral additions facilitates decay of aspen bark / I. Kurganova, V. Lopes de Gerenuy, N. Galibina [et al.] // Geoderma. — 2018. — Vol. 316. — P. 27–37.
12. Olson J.S. Energy storage and the balance of producers and decomposers in ecological systems / J.S. Olson // Ecology. — 1963. — Vol. 44. — № 2. — P. 322–331.
13. Berg B. Decomposition patterns for foliar litter: A theory for influencing factors / B. Berg // Soil Biology and Biochemistry. — 2014. — Vol. 78. — P. 222–232.
14. Nikonova L. Impact of Temperature and Moisture on the Decomposition of Peat-Forming Plants: Results of a Two-Year Incubation Experiment / L. Nikonova, I. Kurganova, V. Lopes de Gerenuy [et al.] // Forests. — 2023. — Vol. 14. — № 12. — P. 2355.
15. Funktsionirovanie mikrobnikh kompleksov v verkhovikh torfyanikakh — analiz prichin medlennoi destruktsii torfa: monografiya [Functioning of microbial complexes in raised bogs — analysis of the causes of slow peat destruction: monograph] / Ed. by I.Yu. Chernova. — Moscow: KMK Scientific Publishing Company, 2013. — 128 p. [in Russian]
16. Fioretto A. Lignin and cellulose degradation and nitrogen dynamics during decomposition of three leaf litter species in a Mediterranean ecosystem / A. Fioretto, C. Di Nardo, S. Papa [et al.] // Soil Biology and Biochemistry. — 2005. — Vol. 37. — № 7. — P. 1083–1091.
17. Bambalov N.N. Prevrashchenie otmershikh rastenii v bolotnikh biogeotsenozakh [Transformation of dead plants in bog biogeocenoses] / N.N. Bambalov, A.V. Khoruzhik, Ye.S. Lukoshko [et al.] // Eksperiment i matematicheskoe modelirovanie v izuchenii biogeotsenozov lesov i bolot [Experiment and Mathematical Modeling in the Study of Biogeocenoses of Forests and Bogs] / Ed. by V.P Strigutsky, N.N Bambalova. — Moscow: Nauka, 1990. — P. 53–63. [in Russian]
18. Hajek T. Habitat and species controls on Sphagnum production and decomposition in a mountain bog / T. Hajek // Boreal Environmental Research. — 2009. — № 14. — P. 947–958.