

АККУМУЛЯЦИЯ УГЛЕРОДА В ПОДСТИЛКАХ СРЕДНЕТАЁЖНЫХ ЛИСТВЕННЫХ ЛЕСОВ РЕСПУБЛИКИ КОМИ

© 2023

Пристова Т.А.

Институт биологии Коми научного центра УрО РАН (г. Сыктывкар, Российская Федерация)

Аннотация. Представлены данные по запасам и содержанию углерода в опаде и подстилках среднетаёжных разновозрастных лиственных лесов, формирующихся на месте вырубки ельников черничного типа. Определено, что подстилка березово-елового молодняка аккумулирует 10 тС/га, при этом ежегодно с наземным опадом поступает 1 тС/га, в осиново-березовом насаждении – 8 и 2 тС/га соответственно. Результаты исследований показали, что вклад опада подземной части растительности в аккумуляцию углерода в подстилке сопоставим с надземной частью и составляет около 1 тС/га в год для древесных растений и 0,6–1,1 тС/га в год для растений напочвенного покрова. Скорость ежегодного высвобождения углерода в процессе деструкции подстилки составляет 21–30%, для опада ассимилирующих органов деревьев и растений напочвенного покрова – 42–79%, для ветвей, шишек и древесных корней – 7–24%. Содержание углерода в подстилке дифференцировано по подгоризонтам: его концентрация в O_i выше, чем в $O_e + O_a$. В исследуемых лиственных насаждениях увеличение запасов подстилки от верхнего подгоризонта к нижнему обратно пропорционально накоплению углерода. Среднегодовая скорость оборота углерода в исследуемых подстилках составляет около 3 лет.

Ключевые слова: средняя тайга; послерубочные лиственные леса; лесная подстилка; запас углерода; растительный опад; скорость разложения опада.

CARBON STOCKS IN THE LITTER OF THE MIDDLE TAIGA DECIDUOUS FORESTS OF THE KOMI REPUBLIC

© 2023

Pristova T.A.

Institute of Biology of Komi Scientific Centre of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences
(Syktyvkar, Russian Federation)

Abstract. Data are presented on the stock and content of carbon in the litter-fall and litter of middle-taiga deciduous forests of different ages, which are formed at the site of felling of bilberry-type spruce forests. It has been determined that the litter of birch-spruce young stands accumulates 10 tC/ha, while annually with ground litter 1 tC/ha enters, in aspen-birch stands – 8 and 2 tC/ha, respectively. The results of the research have shown that the contribution of the litter of the underground part of vegetation to the accumulation of carbon in the litter is comparable to the above-ground one and is about 1 tC/ha per year for woody plants and 0,6–1,1 tC/ha per year for ground cover plants. The rate of annual carbon release in the process of litter destruction is 21–30%, for the fall of assimilating organs of trees and plants of the ground cover – 42–79%, for branches, cones and tree roots – 7–24%. The carbon content in the litter is differentiated by subhorizons: its concentration in O_i is higher than in $O_e + O_a$. In the studied deciduous stands, the increase in litter reserves from the upper subhorizon to the lower subhorizon is inversely proportional to carbon accumulation. The average annual rate of carbon turnover in the litters is about 3 years.

Keywords: middle taiga; post-cutting deciduous forests; forest litter; carbon stock; plant litter; litter decomposition rate.

Введение

Лесам принадлежит ведущая роль в формировании запасов органического углерода и в углеродном цикле в целом. Одним из элементов лесных экосистем, отражающим их устойчивость и поддержание баланса, является лесная подстилка. Ее формирование и разложение является важным компонентом углеродного бюджета [1]. Запасы почвенного углерода непосредственно связаны с подстилкой, так как в почве он находится в состоянии динамического равновесия: пополняется за счет растительного опада и углерода атмосферных осадков и убывает, подвергаясь окислению, микробному разложению и выносу за пределы почвенной толщи [2; 3]. Качественный состав растительного опада и скорость его деструкции являются одними из важнейших факторов, влияю-

щим на формирование и аккумуляцию углерода в подстилках лесных экосистем [1; 2]. Интерес к роли лесной подстилки в глобальном углеродном цикле в конце 90-х годов XX века заметно вырос, поскольку увеличение в атмосфере содержания углекислого газа повлияет на химический состав подстилки, а глобальное потепление может повысить скорость ее разложения [2]. Запасы углерода в подстилке во многом определяют углероддепонирующую роль лесных почв Севера [4]. Рубка таёжных лесов привела к формированию больших площадей производных лиственных насаждений, в которых процессы формирования подстилки и потоки углерода качественно отличаются от хвойных лесов [5; 6]. Данных по определению запасов углерода в лесных подстилках лиственных лесов в тайге, в том числе формирующихся

на месте вырубок, в отечественной [5–8] и зарубежной литературе [9] немного, а для Республики Коми они единичны [5; 6]. Цель работы – определение содержания и запасов углерода в подстилке, ежегодном опаде, оценка высвобождения углерода в результате деструкционных процессов в среднетаёжных разновозрастных лиственных лесах.

Объекты исследования

Исследования проводились в течение 10 лет (2004–2014 гг.) в Княжпогостском районе Республики Коми (подзона средней тайги). Постоянные пробные площади (ППП) закладывали в березово-еловом молодняке разнотравном (состав древостоя – 8Б2Еед.С ед.Ос) и средневозрастном осиново-березовом насаждении разнотравно-черничного типа (5Ос4Б1Еед.Пх) (62°18' с.ш., 50°55' в.д.), которые сформировались после рубок, проведенных в 70–90-х гг. XX в. в ельниках черничного типа. Подробное описание древостоя, подроста и подлеска исследуемых объектов приведено ранее [10; 11]. Напочвенный покров березово-елового насаждения насчитывает 28 видов растений с общим проективным покрытием (ОПП) до 90%, в том числе травяно-кустарничкового яруса – 40, мохового – 60%. В осиново-березовом насаждении ОПП растений напочвенного покрова осиново-березового насаждения, сформированного 27 видами, составляет 60%, в том числе проективное покрытие травяно-кустарничкового яруса – 50%, мохового – 10%. Подробная характеристика напочвенного покрова исследуемых насаждений приведена ранее [12]. В березово-еловом насаждении мощность подстилки составляет 0–11(13) см, в осиново-березовом – 0–6(9) см. Почва обоих насаждений, согласно «Мировой реферативной базе почвенных ресурсов» – Stagnic Histic Albeluvisols [13].

Материалы и методика исследований

Запас подстилки учитывался путем ее отбора шаблоном площадью 0,09 или 0,04 м² в 10 или 20-кратной повторности соответственно [14]. Подстилку разделяли на 2 части: слой Oi, образованный опадом, содержащий все фракции опада (ветви, хвоя, листья и т.д.), сохраняющие свою морфологическую структуру, и Oe + Oa – относительно однородный слой гумификации и ферментации. Из подстилки удаляли минеральные примеси и выделяли корни толщиной <10 мм и 10–20 мм, затем корни промывали через сито с диаметром отверстий 0,25 см и распределяли по видам. Осенью и весной с помощью опадоуловителей (размером 50 × 50 см) определено количество надземного древесного опада в 20-кратной повторности. Опад растений напочвенного покрова рассчитан через его фитомассу, определяемую методом укоса в 10–20-кратной повторности [14]. Для изучения скорости разложения растительного опада и подстилки использовались капроновые мешочки размером 20 × 25 см с ячейкой 1 мм. Они закладывались в лесную подстилку в 5–15-кратной повторности и извлекались по истечении 12 месяцев [14; 15]. Образцы высушивались при температуре +105°C до состояния абсолютно сухого вещества (а.с.в.), взвешивались и отбирались для последующего химического анализа [14]. Концентрация С и N в образцах растительного опада, опада через 1 год по-

сле разложения и подстилки определена методом газовой хроматографии на элементном анализаторе EA 1110 (CHNS-O) «Carlo Erba Instruments» (Италия) в экоаналитической лаборатории Института биологии Коми НЦ УрО РАН. Все полученные данные за 10-летний период усредняли и определяли отклонение от среднего многолетнего значения.

Результаты исследования

и их обсуждение

Согласно проведенным исследованиям, ежегодно с надземным опадом на поверхность почвы березово-елового насаждения поступает 1,1 тС/га, в том числе с древесным – 0,7, с опадом растений напочвенного покрова – 0,4 тС/га, осиново-березового – 1,7, 1,4 и 0,3 тС/га соответственно (рис. 1). Как известно, в лиственных лесах количество опада и, как следствие, углерода в нем выше, чем в хвойных [1; 2; 9; 16]. Количество углерода, поступающего с древесным опадом в ельниках средней тайги Республики Коми, занимает промежуточное значение между исследуемыми насаждениями и содержит 0,9 тС/га, в то время как в опаде растений напочвенного покрова практически такое же – 0,3 тС/га [4].

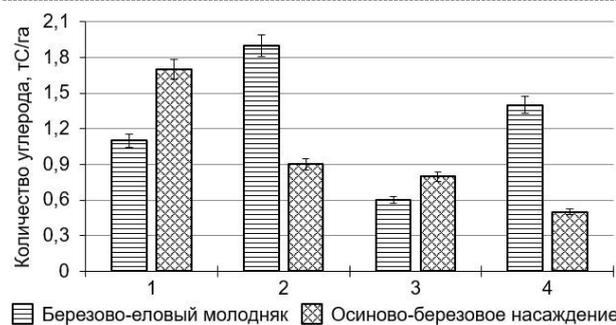


Рисунок 1 – Количество углерода, ежегодно поступающего с надземным (1) и подземным (2) опадом и высвобождающегося из подстилки при разложении с надземным (3) и подземным (4) опадом березово-елового молодняка и осиново-березового насаждения

Состав древесного опада исследуемых насаждений различается: в опаде березово-елового насаждения преобладают листья березы, с ними в подстилку поступает около 65%, в осиново-березовом – с листьями осины и березы – 72% углерода от общего количества в годичном древесном опаде. Это обусловлено различиями в составе древостоя. Следует отметить, что в исследуемых лиственных насаждениях более 80% углерода, поступающего ежегодно в подстилку с древесным опадом, представлено листьями и хвоей. Поступление углерода с ним имеет сезонную динамику: в период с октября по май в подстилку березово-елового молодняка поступает около 30, в осиново-березовом насаждении около 20% от углерода, ежегодно поступающего с древесным опадом. Концентрация углерода в компонентах древесного опада варьирует в небольших пределах от 48 в ветвях осины до 50% абсолютно сухого вещества в листьях березы, в опаде растений напочвенного покрова – от 42 во мхах до 49% в кустарничках. В подстилках средняя концентрация углерода ниже, чем в опаде – 21–22% а.с.в. (табл. 1).

Таблица 1 – Средние многолетние показатели подстилок исследуемых лиственных насаждений

Подгоризонт подстилки	Скорость разложения, % в год	Масса подстилки, т/га	Концентрация углерода, %	C/N	Запасы углерода, тС/га	Высвобождается из подстилки, тС/га в год
Березово-еловый молодняк						
O _i	30,40 ± 5,74	17,0 ± 7,4	39,0 ± 4,0	30,2	6,6 ± 2,9	1,9 ± 1,1
O _e + O _a	16,34 ± 3,64	28,7 ± 15,5	12,2 ± 1,2	21,4	3,5 ± 1,9	0,6 ± 0,2
O	21,38 ± 2,60	46,1 ± 19,3	22,0 ± 2,4	20,6	10,1 ± 2,1	2,5 ± 0,9
Осиново-березовое насаждение						
O _i	45,95 ± 5,58	15,0 ± 3,5	32,0 ± 3,0	22,2	4,8 ± 1,2	2,7 ± 0,4
O _e + O _a	14,72 ± 1,50	25,0 ± 10,7	14,5 ± 0,5	16,7	3,6 ± 1,5	0,5 ± 0,2
O	29,80 ± 2,40	40,0 ± 11,6	21,1 ± 2,1	17,5	8,4 ± 1,9	3,3 ± 1,4

Интенсивность высвобождения углерода в процессе деструкции опада определяется скоростью разложения его компонентов. Высокой скоростью разложения в древесном опаде отличаются листья рябины – 46,6 ± 7,4, ивы – 46,9 ± 12,4 и березы – 36,5 ± 9,7% в год, низкой – ветви и шишки – от 7 до 20% в год. В опаде растений напочвенного покрова наибольшей интенсивностью деструкции отличается лесное разнотравье – до 78,5 ± 1,1% в год, наименьшей – мхи и кустарнички 25,7 ± 3,5 и 33,9 ± 2,5% в год соответственно. Схожие показатели приводятся для Карелии и Коми [16; 17]. Скорость разложения корней древесных растений в зависимости от вида и толщины варьирует от 9 до 24, трав и кустарничков от 30 до 53% в год. В различные годы исследований скорость разложения и, как следствие, интенсивность высвобождения углерода из опада варьирует. Так, скорость разложения листьев березы за 12 месяцев в молодняке за годы исследований изменялась: минимальная скорость деструкции составляла – 32,9 ± 6,4%, максимальная – 46,8 ± 13,8%. В процессе разложения опада в березово-еловом насаждении в течение года высвобождается в среднем 0,6 тС/га, в том числе из древесного – 0,3, из опада растений напочвенного покрова 0,3 тС/га, в осиново-березовом насаждении 0,8, 0,6 и 0,2 тС/га соответственно. С опадом корней древесных растений ежегодно в подстилку исследуемых насаждений поступает около 1 тС/га, из них в процессе разложения высвобождается не более 0,3 тС/га (рис. 1). При этом количество углерода, поступающего с тонкими корнями древесных растений, составляет около 20% от общего количества углерода в опаде корней деревьев в подстилочном горизонте. С опадом подземных органов растений травяно-кустарничкового яруса в подстилку березово-елового молодняка ежегодно поступает 1,1 тС/га, из которых высвобождается 0,6 тС/га, в осиново-березовом насаждении – 0,6 и 0,3 тС/га соответственно (рис. 1).

В подстилке березово-елового насаждения накапливается 46, осиново-березового – 40 т/га органического вещества, при этом аккумуляция углерода в них составляет 10,1 и 8,4 тС/га соответственно (табл. 1). Различия в запасах и депонировании углерода в исследуемых подстилках связаны с тем, что верхний слой подстилки в осиново-березовом насаждении разлагается в 1,5 раза интенсивнее, чем в молодняке (табл. 1). Как показано ранее, в осиново-березовом насаждении значительная часть опада представлена листьями осины и березы и небольшим количеством хвои ели, а такой опад разлагается более интенсивно [17].

Запасы углерода в подстилках исследуемых лиственных насаждений в 2–3 раза ниже, чем в ельниках черничного типа и 5-летней вырубке средней тайги Республики Коми [3–5]. Подобное различие с ельниками наблюдается в среднетаёжных березняках и осинниках Карелии [8]. Более низкие запасы углерода в подстилках исследуемых насаждений, по сравнению с ельниками, обусловлены видовым составом опада и более высокой скоростью разложения большинства его компонентов и подстилки [3; 4; 9; 18; 19]. Различия в концентрации углерода, скорости разложения и отношении C/N между подгоризонтами исследуемых подстилок довольно четко выражены и статистически значимы ($P < 0,05$) (табл. 1). Верхний п/горизонт подстилок отличается более высокой концентрацией углерода и отношением C/N. Поэтому, несмотря на то, что более 60% от общей массы подстилок сосредоточены в нижнем подгоризонте, большее количество углерода аккумулируется в верхнем подгоризонте. Выявлена отрицательная корреляционная связь ($r > 0,8$) между массой подгоризонтов подстилки и аккумуляцией углерода в них ($n = 80$). Это позволяет предположить, что в исследуемых лиственных насаждениях снижение аккумуляции углерода в подстилке от верхнего подгоризонта к нижнему обратно пропорционально запасам подстилки. В ельниках подобной закономерности не наблюдается: в верхнем п/горизонте еловых подстилок аккумулируется меньше углерода, чем в нижних. Это обусловлено отсутствием разницы в концентрации углерода между подгоризонтами, а также отличием состава и скорости разложения древесного опада и более выраженными слоями гумификации (O_e) и ферментации (O_a) подстилки в ельниках [3; 19; 20].

В углеродном цикле лесных экосистем подземной части фитомассы придается особое значение, так как углерод при отмирании и разложении корней пере-

ходит непосредственно в подстилку и нижележащие почвенные слои. В среднем количество углерода, поступающего с опадом подземной части в исследуемых насаждениях, сопоставимо с надземной (рис. 1). Участие корней в круговороте углерода двояко: с одной стороны, опад корней разлагается медленнее надземного, из-за содержания одревесневших тканей, с другой – включение продуктов разложения корневых остатков в гумусовые вещества подстилки значительно интенсивнее, чем у наземного опада, и связано с характером локализации опада и условий его деструкции [21]. Тонкие корни (<10 мм) в подстилке и верхнем 20-см слое почвы по динамике разложения относятся к очень быстрым в пуле мобильного органического вещества (МОВ) [22]. Согласно ранее полученным данным, скорость разложения подземных органов растений ниже, чем надземных [17]. Результаты наших исследований показали, что вклад тонких древесных корней, сосредоточенных в подстилке, в пул МОВ небольшой. Поэтому активнее в данный пул вовлекаются корни травянистых растений, интенсивность деструкции которых в 2–3 раза выше, чем древесных. Расчеты на основании полученных данных показали, что среднегодовая скорость оборота углерода в исследуемых подстилках, которая определяется отношением запасов углерода в подстилке к его количеству в опаде, составляет около 3 лет.

Выводы

1. Запасы углерода в подстилках среднетаёжных лиственных насаждений послерубочного происхождения составляют 8–10 тС/га. Показано, что накопление углерода в подгоризонтах подстилок обратно пропорционально их запасу.

2. Установлено, что с годичным опадом на поверхность почвы исследуемых насаждений поступает 1,0–1,7 тС/га, из которых 50–60% высвобождается в процессе деструкции. С корневым опадом растений в подстилку поступает 1,6–2,2 тС/га, из них около 40% высвобождаются при разложении.

3. Интенсивность высвобождения углерода в течение года в процессе деструкции составляет 42–79% для опада ассимилирующих органов деревьев и растений напочвенного покрова, для ветвей, шишек и древесных корней – 7–24%. Скорость оборота углерода в исследуемых подстилках составляет около 3 лет.

4. Полученные данные позволяют оценить депонирование, динамику и потоки углерода в подстилках среднетаёжных лиственных лесов послерубочного происхождения.

Список литературы:

1. Aerts R. Climate, leaf litter chemistry and leaf litter decomposition in terrestrial ecosystems: a triangular relationship // *Oikos*. 1997. Vol. 79, № 2. P. 439–449. DOI: 10.2307/3546886.
2. Couteaux M.-M., Bottner P., Berg B. Litter decomposition, climate and litter quality // *Trends in Ecology & Evolution*. 1995. Vol. 10, iss. 2. P. 63–66. DOI: 10.1016/s0169-5347(00)88978-8.
3. Бобкова К.С., Кузнецов М.А. Бюджет углерода в экосистемах среднетаёжных коренных ельников // *Журнал общей биологии*. 2022. Т. 83, № 6. С. 434–449.

4. Бобкова К.С., Машика А.В., Смагин А.В. Динамика содержания углерода органического вещества в среднетаёжных ельниках на автоморфных почвах. СПб.: Наука, 2014. 270 с.

5. Лиханова Н.В., Бобкова К.С. Пулы и потоки углерода в экосистемах вырубки ельников средней тайги Республики Коми // *Теоретическая и прикладная экология*. 2019. № 2. С. 91–100. DOI: 10.25750/1995-4301-2019-2-091-100.

6. Osipov A.F., Tuzhilkina V.V., Dymov A.A., Bobkova K.S. Phytomass and organic carbon stocks in the Middle Taiga spruce forests during restoration after clear cutting // *Biology Bulletin*. 2019. Vol. 46, № 2. P. 210–218. DOI: 10.1134/s1062359019020109.

7. Ефремова Т.Т., Ефремов С.П., Аврова А.Ф. Стрение и пространственно-временная изменчивость накопления подстилки в болотных березняках Западной Сибири // *Вестник Томского государственного университета. Биология*. 2009. № 2 (6). С. 84–94.

8. Солодовников А.Н. Показатели плодородия почв под лиственными и хвойными лесами в среднетаёжной подзоне Северо-Запада России [Электронный ресурс] // *Современные проблемы науки и образования*. 2015. № 6. <https://science-education.ru/ru/article/view?id=23221>.

9. Flanagan P.W., Van Cleve K. Nutrients cycling in relation to decomposition and organic matter quality in taiga ecosystems // *Canadian Journal of Forest Research*. 1983. Vol. 13, № 5. P. 795–817. DOI: 10.1139/x83-110.

10. Пристова Т.А. Фитомасса древесных растений в лиственных фитоценозах послерубочного происхождения // *Лесной вестник. Forestry Bulletin*. 2020. Т. 24, № 1. С. 5–13. DOI: 10.18698/2542-1468-2020-1-5-13.

11. Пристова Т.А. Фитомасса подлеска в производных лиственных насаждениях средней тайги // *Лесотехнический журнал*. 2020. Т. 10, № 1 (37). С. 60–68. DOI: 10.34220/issn.2222-7962/2020.1/6.

12. Пристова Т.А. Динамика надземной фитомассы живого напочвенного покрова в лиственных фитоценозах послерубочного происхождения // *Известия Самарского научного центра Российской академии наук*. 2019. Т. 21, № 2 (2). С. 204–209.

13. World reference base for soil resources. International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. Rome: FAO, 2015. 181 p.

14. Родин Л.Е., Ремезов Н.П., Базилевич Н.И. Методические указания к изучению динамики и биологического круговорота в фитоценозах. Л.: Наука. Ленинград. отд-ние, 1967. 143 с.

15. Kochy M., Wilson S.D. Litter decomposition and nitrogen dynamics in aspen forest and mixed-grass prairie // *Ecology*. 1997. Vol. 78, iss. 3. P. 732–739. DOI: 10.1890/0012-9658(1997)078[0732:ldandi]2.0.co;2.

16. Германова Н.И., Медведева М.В., Мамай А.В. Динамика разложения листового опада в среднетаёжных насаждениях Карелии // *Известия высших учебных заведений. Лесной журнал*. 2012. № 1 (325). С. 24–32.

17. Пристова Т.А. Скорость разложения растительного опада в лиственных насаждениях послерубочного происхождения в условиях средней тайги Республики Коми // *Труды Санкт-Петербургского научно-исследовательского института лесного хозяйства*. 2020. № 3. С. 62–72.

18. Cartner T.B., Cardon Z.G. Decomposition dynamics in mixed-species leaf litter // *Oikos*. 2004. Vol. 104, iss. 2. P. 230–246.

19. Добровольский Г.В., Трофимов С.Я., Дорофеева Е.И., Лузиков А.В., Гей К.А. Скорость разложения

лесных подстилок южнотаёжных ельников // Лесоведение. 1999. № 1. С. 3–9.

20. Berg B., Staaf H. Release of nutrients from decomposing white birch leaves and Scots pine needle litter // Pedobiologia. 1987. № 30 (1). P. 55–63. DOI: 10.1007/bf02187367.

21. Ruess R.W., Van Cleve K., Yarie J., Viereck L.A. Contributions of fine root production and turnover to the carbon and nitrogen cycling in taiga forests of the Alaskan interior // Canadian Journal of Forest Research. 1996. Vol. 26, № 8. P. 1326–1336. DOI: 10.1139/x26-148.

22. Kurtz W.A., Beukema S.J., Apps M.J. Estimation of root biomass and dynamics for the carbon budget model of

the Canadian forest sector // Canadian Journal of Forest Research. 1996. Vol. 26, № 11. P. 1973–1979. DOI: 10.1139/x26-223.

Работа выполнена при финансовой поддержке темы госзадания Института биологии Коми научного центра УрО РАН «Зональные закономерности динамики структуры и продуктивности первичных и антропогенно измененных фитоценозов лесных и болотных экосистем европейского Северо-Востока России» (№ 122040100031-8).

Информация об авторе(-ах):	Information about the author(-s):
<p>Пристова Татьяна Александровна, кандидат биологических наук, научный сотрудник отдела лесобиологических проблем Севера; Институт биологии Коми научного центра УрО РАН (г. Сыктывкар, Российская Федерация). E-mail: pristova@ib.komisc.ru.</p>	<p>Pristova Tatiana Alexandrovna, candidate of biological sciences, researcher of Forest Biology Problems of the North Department; Institute of Biology of Komi Scientific Centre of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences (Syktyvkar, Russian Federation). E-mail: pristova@ib.komisc.ru.</p>

Для цитирования:

Пристова Т.А. Аккумуляция углерода в подстилках среднетаёжных лиственных лесов Республики Коми // Самарский научный вестник. 2023. Т. 12, № 2. С. 81–85. DOI: 10.55355/snv2023122112.