

УДК 631.417:631.433.83

І.М. Шпаківська

**БАЛАНСОВА ОЦІНКА КРУГООБИГУ ВУГЛЕЦЮ В ЕКОСИСТЕМАХ  
БОРЕАЛЬНОГО РЯДУ НА ВЕРХНІЙ МЕЖІ ЛІСУ В ЧОРНОГОРІ  
(УКРАЇНСЬКІ КАРПАТИ)**

*Шпаківська І.М. Балансовая оценка круговорота углерода в экосистемах бореального ряда на верхней границе леса в Черногоре (Украинские Карпаты) // Науч. зап. Гос. природоведч. музея. – Львов, 2009. – Вып. 25. – С. 91-98.*

Проведены балансовые расчеты и установлены режимы трансформации углерода в первичных и вторичных экосистемах. Выявлено, что в экосистемах со стационарно-периодическим типом круговорота – ельнике и красноовсянничнике ежегодное поступление растительных остатков равняется их годовому разложению, а среднегодовая интенсивность минерализации растительных остатков и почвенного гумуса – интенсивности его образования. Для вторичных экосистем кустарничковых и травяных формаций характерны переходные режимы трансформации углерода: для черничника – переходной с потерями, поскольку интенсивность гумификации меньше, чем темпы минерализации, а для белоусника – переходной с накоплением, так как интенсивность минерализации ниже, чем скорость гумификации.

*Shpakivska I.M. The balancing estimation of organic carbon turnover in the ecosystems of boreal series on timberline of Chornogora (Ukrainian Carpathians) // Proc. of the State Nat. Hist. Museum. – Lviv, 2009. – 25. – P. 91-98.*

Calculations of balances and certainly regimes transformation of organic carbon were carried out for the primeval and secondary ecosystems. Were show that for the ecosystems with the stationary – periodicals type – spruce forest and grassland with the dominated of *Festuca rubra* – annual receipt of derbies equals their annual mineralization and value of annual mineralization of plants materials and soils organic was near to intensity of its humus formation. For the secondary scrub and grass were established the transitional type of carbon turnover: for the ecosystem with the dominated of *Vaccinium myrtillus* – transitional with the losses of carbon, as the value of humification was less than rates of mineralization. For the secondary grass with the dominated of *Nardus stricta* – transitional with the accumulation of carbon, but the rate of mineralization was less than humification.

Важливу роль у забезпеченні сучасного рівня CO<sub>2</sub> в атмосфері відіграють процеси мінералізації та гуміфікації вуглецю в наземних екосистемах. Глобальні зміни клімату зумовлюють інтенсифікацію потоку неорганічного вуглецю з поверхні ґрунтів, зокрема у північних широтах та гірських регіонах, за рахунок біохімічної деградації органічної речовини. На думку С. Нільссона зі співавторами [10], кругообіг вуглецю – це динамічна відкрита система, що утворюється за рахунок нестационарних процесів. Методологія оцінки його балансу базується на поєднанні методів, які враховують потоки та динаміку резервуарів вуглецю в наземних екосистемах. Кожен із типів екосистем розглядається як система блоків: надземна і підземна фітомаса, фітодетрит, мікробна біомаса, лабільна та стабільна органічна речовина ґрунту, які поєднані потоками вуглецю за рахунок обмінних процесів. Пули органічної речовини в окремих блоках-резервуарах забезпечуються взаємодією двох протилежних процесів: фотосинтетичної асиміляції вуглецю атмосфери та його вивільнення внаслідок гетеротрофного дихання та міграції лабільних сполук вуглецю

[2, 14]. Актуальною є оцінка балансу вуглецю в наземних екосистемах регіонів, які є потенційним його стоком за рахунок тривалого депонування в органічній речовині ґрунтів [10].

Основну частину природної емісії вуглекислого газу внаслідок мінералізації вуглецю становить гетеротрофне дихання, яке за абсолютними величинами може перевищувати антропогенні емісії, особливо в гірських регіонах зі значною часткою природних екосистем за низької концентрації об'єктів промислового і комунального секторів. Оскільки антропогенний вплив на природні екосистеми гірських регіонів призводить до розбалансування циклу вуглецю, важливо встановити як унаслідок цього змінюються потоки вуглецю між компонентами екосистем.

Метою досліджень на високогірному біологічному стаціонарі Інституту екології Карпат НАН України „Пожижевська” була оцінка балансу вуглецю в екосистемах бореального сукцесійного ряду, які приурочені до сучасної верхньої межі лісу хребта Черногора (Українські Карпати).

### Територія та методика досліджень

Лісова рослинність на північно-східних схилах Черногори була зведена наприкінці XVIII ст., а створені на її місці вторинні лучні екосистеми протягом двох століть використовувались як пасовища. Після 1974 р., внаслідок створення на цій території Карпатського національного природного парку, за рахунок демутаційних процесів розпочалося відновлення смерекових лісів [7]. На теперішній час верхня межа лісу характеризується складною мозаїчністю первинних лісових, вторинних чагарничкових і лучних рослинних угруповань, які перебувають на різних стадіях демутації. Для кожної з них характерний індивідуальний режим трансформації органічної речовини, зумовлений відмінностями едафічних умов і характером рослинного вкриття [4, 7]. Оскільки гранулометричний склад, фізичні та фізико-хімічні властивості ґрунтів, якісний склад органічної речовини ґрунту і хімічний склад компонентів автотрофного блоку екосистем впливають на процеси трансформації органічного вуглецю [20-22], в кожній з екосистем створюються різні умови для перебігу асиміляційно-мінералізаційно-гуміфікаційних процесів, які можна оцінити балансовим методом. З огляду на це, розрахунок річного балансу вуглецю проводили для клімаксової екосистеми смеречини чорницевої та післялісових екосистем чорничника зеленомохового, червонокостричника різнотравного та біловусника типового, які формують бореальний сукцесійний ряд екосистем [6] – один із варіантів сингенетичної демутації у розумінні Б.М. Міркіна [9]. Для цього використовували балансову схему трансформації вуглецю запропоновану А.А. Титляною [13, 14], у якій трансформація сполук вуглецю розглядається як система блоків: фітомаса (G), опад (D), підстилка (L), живі підземні органи (R), мертві підземні органи (V), мікроорганізми (MB), лабільна (LOM) та стабільна органічна речовину ґрунту (SOM), поєднаних між собою потоками сполук вуглецю – асиміляції, гетеротрофного дихання і внутрішньоґрунтової міграції. Кількісну характеристику проводили за літературними даними для G та мортмаси ( $DPM=D+L+V$ ) [3], V визначали розрахунково [12]; власними польовими та лабораторними визначеннями величин SOM, LOM [8, 19, 21], інтенсивності процесів гетеротрофного дихання та міграції водорозчинного вуглецю [20, 21].

## Результати досліджень

Зміна складу біоти під час ендо- чи екзогенних сукцесій екосистем зумовлює трансформацію біогеохімічних циклів всіх елементів-органогенів, які забезпечують речовинно-енергетичну основу їх формування чи функціонування. Виділяють чотири основних типи режимів трансформації вуглецю: стаціонарний, періодичний, перехідний та змішаний [13]. У клімаксових екосистемах за період декількох років кількість чистої первинної продукції (NPP) дорівнює величині мінералізації органічної речовини. У сукцесійних екосистемах впродовж такого ж періоду величина NPP може бути більшою від інтенсивності мінералізації й органічна речовина накопичується за рахунок гуміфікації, або меншою, тоді органічна речовина втрачається за рахунок мінералізації. Перехідний режим з накопиченням характерний для екосистем впродовж первинної сукцесії та сукцесій відновлення. Режим з втратами властивий екосистемам, котрі деградують, зокрема агроекосистемам [9, 13, 14].

Встановлено, що екосистеми бореального ряду відрізняються за запасами органічного вуглецю в різних блоках та інтенсивністю обмінних процесів (табл. 1).

Таблиця 1

### Запаси органічного вуглецю в блоках екосистем бореального ряду й інтенсивність обмінних процесів<sup>1</sup>

Структурні блоки екосистем, потоки вуглецю	Смеречина чорнищева	Чорничник зеленомоховий	Червоно- кошарничник різногравний	Біловусник типовий
Фітомаса – G*	16150	739	402	431
Підстилка – L*	585	609	462	243
Мортмаса – DPM*	827	662	549	338
Мікробна біомаса – MB*	209	176	209	245
Лабільний водорозчинний вуглець (у шарі 0-20 см) LOM*	250	277	155	334
Стабільний вуглець (у шарі ґрунту 0-20 см) – SOM*	11485	13881	7766	10689
Чиста первинна продукція – NPP**	400	353	320	235
Гетеротрофне дихання – Resp**	390	374	312	205
Внутрішньогрунтовий стік – Flit**	22	32	23	46

Примітка: \* - г С м<sup>-2</sup>; \*\* - г С м<sup>-2</sup> рік<sup>-1</sup>

Для екосистеми смеречини чорнищевої величина NPP, яка щорічно відмирає та потрапляє в блок DPM, становить 400 г С м<sup>-2</sup> (рис. 1). Цей потік I<sub>1</sub> є трофічною базою гетеротрофів та джерелом гумусових сполук. У клімаксовій екосистемі щорічне надходження рослинних решток дорівнює їх розкладу, тобто I<sub>1</sub> ≈ I<sub>2</sub> + I<sub>3</sub>, де I<sub>2</sub> –

<sup>1</sup> Перерахунок запасів вуглецю у блоках екосистем G, L, DPM проведено з використанням даних з [3, 17, 20]

інтенсивність гуміфікації, а  $I_3$  – інтенсивність мінералізації. Інтенсивність гуміфікації у бореальних лісах становить 25-26% від  $I_1$  [5], тобто  $110 \text{ г м}^{-2}$ .

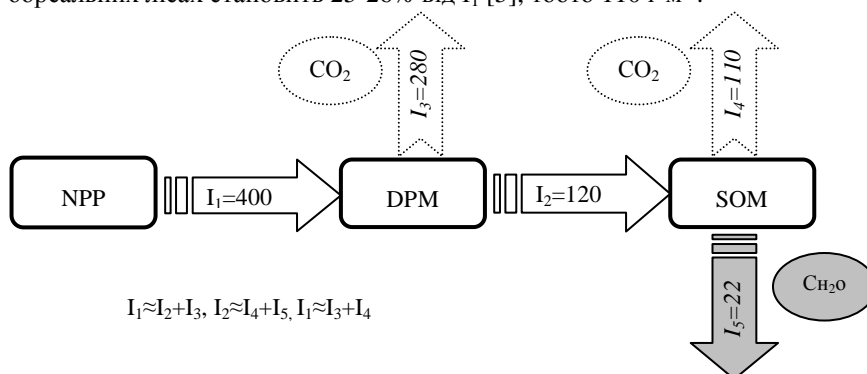


Рис. 1. Схема балансу вуглецю для смеречини чорницевої: NPP – чиста первинна продукція; DPM – рослинні рештки; SOM – органічна речовина ґрунту,  $I_1$  – частка чистої первинної продукції, яка щорічно відмирає,  $I_2$  – гуміфікація,  $I_3$  – мінералізація DPM,  $I_4$  – мінералізація SOM,  $I_5$  – внутріґрунтова міграція водорозчинних сполук вуглецю SOM. Запаси С в блоках NPP, DPM і SOM –  $\text{г С м}^{-2}$ ; інтенсивність процесів –  $\text{г С м}^{-2} \text{ рік}^{-1}$ .

Середньорічна інтенсивність мінералізації фітодетриту  $I_2$  в стаціонарних умовах приблизно дорівнює інтенсивності процесів гуміфікації та внутріґрунтової міграції, тобто  $I_2 \approx I_4 + I_5$ . Ця рівність є однією з основних причин стабільності запасів SOM в ґрунтах клімаксових екосистем. Середньорічна емісія вуглекислого газу, розрахована за період загальної вегетації, становить  $390 \text{ г С-CO}_2 \text{ м}^{-2} \text{ рік}^{-1}$ , що відповідає інтенсивності мінералізації DPM та SOM, а транспорт лабільного вуглецю в нижні горизонти ґрунтового профілю становить  $22 \text{ г С м}^{-2} \text{ рік}^{-1}$ .

Схожий варіант режиму трансформації вуглецю виявлений також для червонокостричника різнотравного (рис. 2). Це дозволяє класифікувати його як квазістаціонарний: інтенсивність процесів мінералізації сягає величини NPP, а накопичення органіки в ґрунті припиняється. Схожі випадки квазістаціонарних режимів описані для вторинних лучних екосистем степової зони [9, 14].

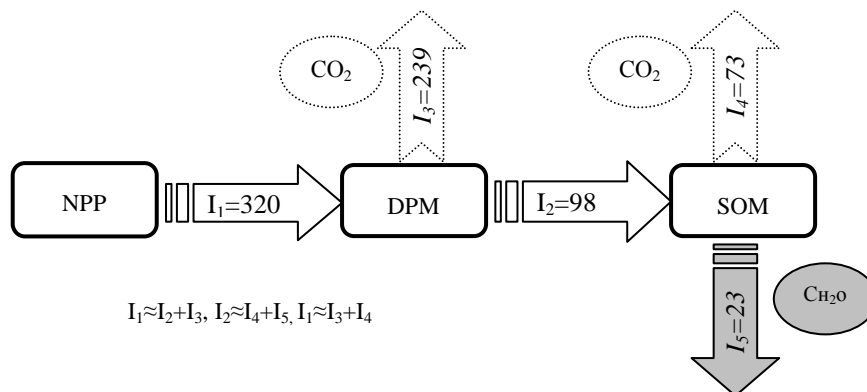


Рис. 2. Схема балансу вуглецю для червонокостричника різнотравного (умовні позначення як на рис. 1).

Для вторинних екосистем чорничника зеленомохового та біловусника типового властиві перехідні режими трансформації вуглецю (рис. 3, 4). Причому для чорничника зеленомохового – перехідний із втратами, оскільки інтенсивність гуміфікації нижча за темпи мінералізації SOM та вимивання, тобто  $I_2$  менше  $I_4+I_5$ , а для біловусника типового – перехідний з накопиченням, де мінералізація SOM менша від гуміфікації DPM.

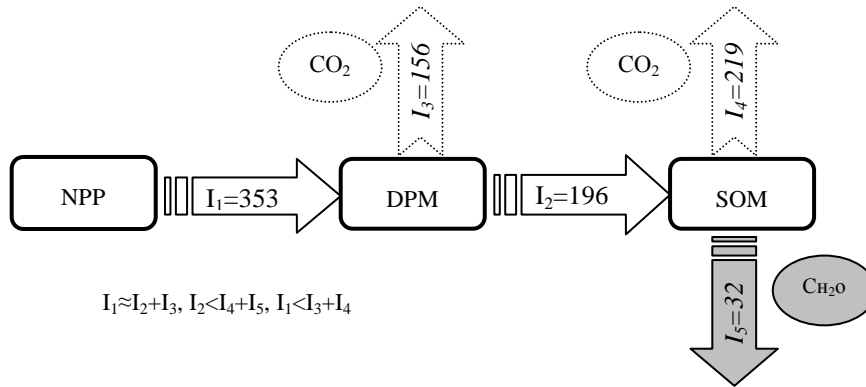


Рис. 3. Схема балансу вуглецю для чорничника зеленомохового (умовні позначення як на рис. 1).

Враховуючи, що величини NPP і DPM у вторинних чорничнику зеленомоховому та біловуснику типовому є постійними впродовж тривалого часу, можна вважати, що у цих екосистемах підсистема "NPP – відмирання – DPM – розклад" уже досягла стаціонарного рівня, а підсистема "DPM – гуміфікація – SOM – мінералізація" ще ні. Такий режим функціонування характеризується тим, що в багаторічних дослідженнях для однієї підсистеми виконуються умови стаціонарного, а для інших – перехідного режиму з накопиченням чи втратами [13].

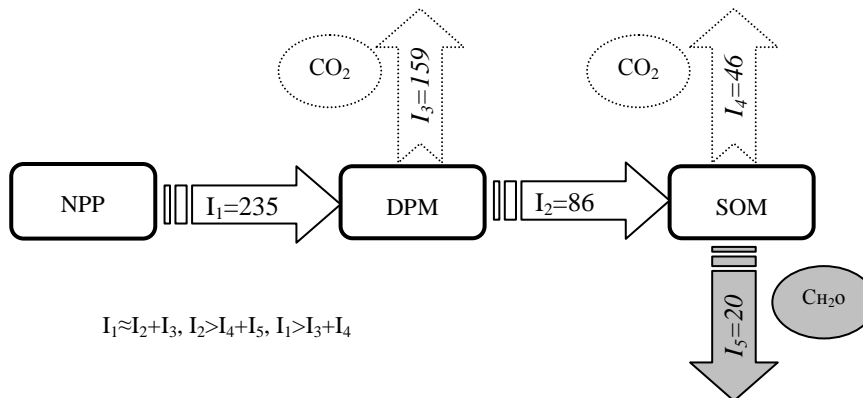


Рис. 4. Схема балансу вуглецю для біловусника типового (умовні позначення як на рис. 1).

Для оцінки переходу до стаціонарно-періодичного режиму ґрунтового блоку екосистем бореального сукцесійного ряду було проаналізовано окремі компоненти органічного вуглецю в 0-20 см шарі ґрунту (табл. 2).

Таблиця 2

**Розподіл органічного вуглецю в підземному блоці екосистем бореального ряду на верхній межі лісу в Чорногорі, % від загального його вмісту**

Екосистема	R	L+V	MB	SOM
Смеречина чорницева	2	7	2	89
Чорничник зеленомоховий	3	3	2	92
Червонокостричник різнотравний	5	7	2	86
Біловусник типовий	5	5	2	88

Встановлено, що частка вуглецю, живих підземних органів (R), що постачають органічні сполуки, які легко мінералізуються та обумовлюють розвиток ризосферних організмів, сягає максимальних величин у лучних екосистемах і лише 2% в лісовій. Надземна (L) та підземна (V) мортмаса, яка є джерелом енергії і трофічною базою гетеротрофів неризосферного шару ґрунту, максимальна також у смеречині чорницевої та червонокостричника різнотравного, дещо нижча в біловуснику типовому та найнижча – в чорничнику зеленомоховому. Відносна частка вуглецю мікробної біомаси (MB) є низькою у всіх екосистемах.

В усіх екосистемах частка вуглецю, акумульована в органічній речовині ґрунту (SOM), становить понад 85% і сягає максимальної величини у чорничнику зеленомоховому. Тобто, накопичення органічного вуглецю відбувається в інертній формі, а частка активних фондів не перевищує 15%, швидкість обміну загального запасу вуглецю сповільнена, що є властивістю зрілих екосистем [11].

Існують також більш узагальнені критерії діагностики режимів трансформації органічного вуглецю в наземних екосистемах без побудови балансових схем за усередненими значеннями співвідношення величин чистої первинної продукції та гетеротрофного дихання [13]. Ступінь мінералізації органіки оцінюється через потік CO<sub>2</sub>, що виділяється в екосистемі за рік, тобто через величину гетеротрофного дихання (Resp). Якщо система перебуває в стаціонарному стані, наприклад клімаксова екосистема, то  $NPP \approx Resp$ . В окремі роки первинна продукція може бути меншою або більшою за гетеротрофне дихання. Якщо система перебуває в перехідному режимі (сукцесійна екосистема), то NPP більша за Resp або Resp більше NPP впродовж достатньо тривалого періоду часу (десятки років). В першому випадку органічна речовина буде накопичуватися в екосистемі, в другому – втрачатиметься [13, 14]. Якщо порівняти величини NPP і Resp, то режими трансформації органічного вуглецю будуть аналогічними для побудованих балансових схем (рис.1-4), тобто у стаціонарному режимі функціонують екосистеми смеречини чорницевої та червонокостричника різнотравного, в перехідному з втратами – чорничника зеленомохового, перехідному з накопиченням – біловусника типового. Але, враховуючи, що NPP відрізняється від Resp на незначні величини (див. табл. 1), можна припустити, що екосистеми чорничника зеленомохового та біловусника типового наближаються до стаціонарно-періодичного режиму функціонування.

Тобто, екосистеми чорничника зеленомохового, червонокостричника різнотравного та біловусника типового мають риси швидше квазістаціонарно-періодичного режиму трансформації органічних сполук, ніж перехідного, який властивий для демутаційних екосистем. Можливо, саме цим можна пояснити, що смерекові ліси на ВМЛ Чорногори відновлюються повільно, на що вказує низка дослідників цієї території [1, 7, 15]. Ці екосистеми, за класифікацією післялісових екосистем А. Байцара [1], можна зарахувати до групи короткочасно-похідних екосистем в зоні верхньої межі лісу, які можуть існувати впродовж 50-150 років до проникнення у них біогруп підросту смереки, які змінять перерозподіл NPP і Resp. У разі відсутності підросту смереки, вони можуть перейти до категорії довготривало-похідних екосистем квазістаціонарного режиму та існувати декілька століть. Окремі дослідники вважають, що швидкість демутації корінних смерекових лісів на місці вторинних щільнодернинних післялісових екосистем у Карпатах можна відкоригувати заходами, які сприяють лісовідновленню: руйнування дернини, підсів насіння, висаджування сіянців смереки тощо [16].

### Висновки

Емісія CO<sub>2</sub> за рахунок гетеротрофного дихання, поряд з величиною чистої первинної продукції, є одним з критеріїв функціонального стану екосистем, зокрема режимів трансформації органічного вуглецю на різних стадіях вторинної сукцесії. Встановлено, що для клімаксової лісової екосистеми властивий стаціонарно-періодичний режим, тобто динамічна зрівноваженість процесів мінералізації та гуміфікації, що є основною причиною стабільності запасів органічного вуглецю.

Для вторинних щільнодернинних екосистем, де відсутній підріст смереки, функціональний стан класифікується як квазістаціонарний, тобто інтенсивність обмінних процесів мінералізації та гуміфікації органічної речовини досягає величини чистої первинної продукції, накопичення органіки припиняється, а її запас залишається стабільним впродовж тривалого часу.

За рахунок процесів демутації, зумовлених проникненням домінанта первинної екосистеми у вторинні чагарничкові та щільнодернинні угруповання, функціонування вторинних екосистем може набувати властивостей перехідного режиму з втратами, коли інтенсивність гуміфікації нижча за темпи мінералізації, або з накопиченням, коли мінералізація нижча від гуміфікації.

1. Байцар А.В. Верхня межа лісу в Українських Карпатах: – Автореф. дис. ... канд. географ. наук. – Львів, 1994. – 16 с.
2. Ведрова Э.Ф., Чупрова В.В. Бюджет углерода в лесных и агроэкосистемах южной тайги центральной Сибири // Организация почвенных систем. (Тр. II национальной конференции с международным участием „Проблемы теории, методологии и философии почвоведения”. Пушино, 5-9 нояб. 2007 г.). – Пушино, 2007. – С. 172-175.
3. Дигрессия биогеоценотического покрова на контакте лесного и субальпийского поясов в Черногоре / под ред. К.А. Малиновского. – К.: Наук. думка, 1984. – 208 с.
4. Климишин О.С., Коржинський Я.В., Інкін С.Д. Демутаційні зміни рослинності на межі лісового і субальпійського поясів у Чорногорі (Українські Карпати) // Наук. зап. Держ. природозн. музею НАН України. – Львів, 2007. – Вип. 23. – С. 17-24.
5. Кобак К.И. Биотические компоненты углеродного цикла. – Л: Гидрометеоздат, 1988. – С. 121-128.

6. Малиновський К.А. Рослинність високогір'я Українських Карпат. – К.:Наук. думка, 1980. – 278 с.
7. Малиновський К.А. та ін. Вплив заповідності на відновлення корінної рослинності у високогір'ї Карпат // Укр. ботан. журн., 1987. – 44, № 3. – С. 127-139.
8. Марискевич О.Г., Шпаківська І.М., Пука Є.О. Запаси органічного вуглецю в екосистемах Говерляньського лісництва Карпатського природного національного парку // Лісова типологія в умовах сталого розвитку лісового господарства України: матеріали Восьмих Погребняківських читань. Харків, 3-5 жов. 2002 р.). – Харків, 2002. – С. 138-142.
9. Миркин Б.М. Антропогенная динамика растительности // Итоги науки и техники. Ботаника. – 1984. – Т. 5. – С. 139-209.
10. Нильссон С., Ваганов Е.А., Швиденко А.З., Столбовой В., Рожков В.А., Мак-Каллум И., Йонас М. Углеродный бюджет растительных экосистем России // Докл. Акад. наук – 2003. – Т. 2, № 4. – С. 541-543.
11. Одум Ю. Экология. Т. 2. – М.: Мир, 1986. – С. 165-191.
12. Рупасова Ж.А. Обмен химическими элементами в лесных сообществах // Структура, функционирование и эволюция системы биогеоценозов Барабы. – Новосибирск: Наука, 1976. – Т. 2. – С. 342-351.
13. Титлянова А.А. О режимах биологического круговорота в наземных биогеоценозах // Почвоведение. – 1989. – № 6. – С. 71-80.
14. Титлянова А.А., Тесаржева М. Режимы биологического круговорота. – Новосибирск: Наука. Сиб. отд., 1991. – 150 с.
15. Царик Й.В. Вікова структура автотрофних компонентів біогеоценозів і їх консортивна організація // Структура високогірних фітоценозів Українських Карпат. – К.: Наук. думка, 1993. – С. 29-38.
16. Цурик Е.М. Особенности растительности и почв в полосе контакта полонины и елового леса в Карпатах // Лесоведение. – 1988. – № 4. – С. 49-59.
17. Чернобай Ю.Н., Марискевич О.Г. Диагностика антропогенных изменений детрита в бурых горно-лесных почвах Карпат // Деградация и восстановление лесных почв. – М.: Наука, 1991. – С. 163-174.
18. Шпаківська І.М. Режимы трансформації органічного вуглецю в екосистемах Чорногори // Наук. вісник УкрЛДТУ „Проблеми і перспективи розвитку лісового господарства”. – Львів, 1998. – Вип. 9.1. – С. 81-86.
19. Шпакивская И.М., Марискевич О.Г., Пука Е.А. Углерод в почвах Карпатского национального природного парка (Украинские Карпаты) // Вторая междунар. конф. „Эмиссия и сток парниковых газов на территории Северной Евразии”: тезисы докл. – Пушино, 2003. – С. 134-136.
20. Insam H., Domsch K.H. Relationship between soil organic carbon and microbial biomass on chronosequences of reclamation sites // Microbial Ecology. – 1988. – № 15. – P. 177-188.
21. Shpakivska I. Microbial biomass, C and N mineralization in mineral soil of adjacent montane ecosystems on timberline (East Carpathians Mts.) // Proc. Congress of the Polish Society of Soil. Sci. and Intern. Sci. Conference. – Lublin, 1999. – P. 474-475.
22. Singh J.S., Gupta S.R. Plant decomposition and soil respiration in terrestrial ecosystems // Botan. Rev. – 1977. – V. 43, №.4. – P. 449-528.

Інститут екології Карпат НАН України, м. Львів  
e-mail: ishpakivska@ukr.net