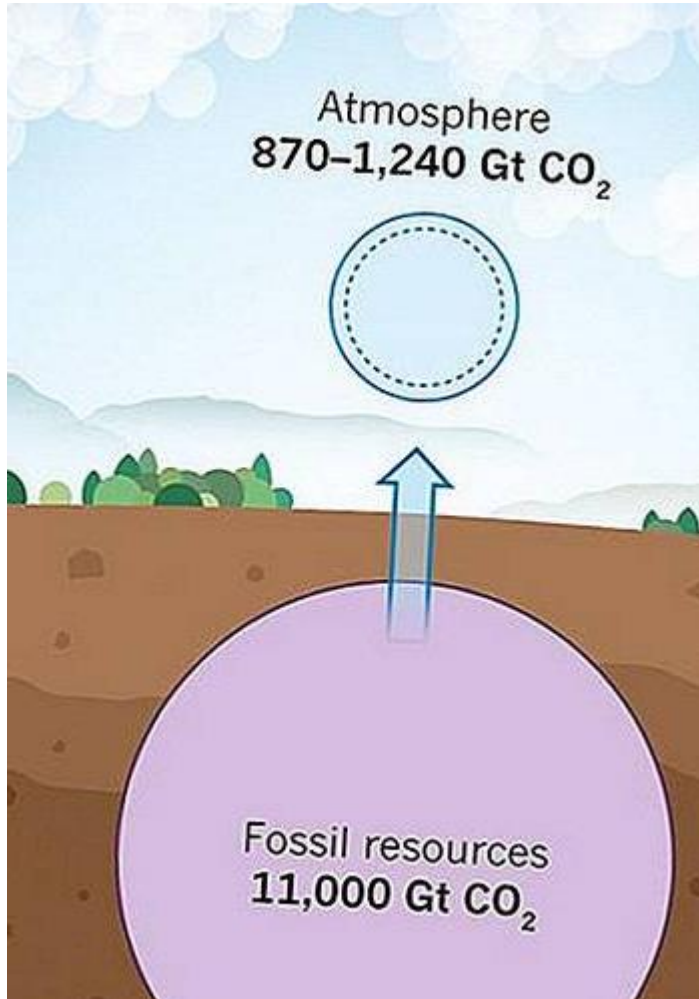




***Вуглецева ємність природних екосистем  
як можливість пом'якшення кліматичних змін  
(можливості оцінки та управління)***

***Шпаківська Ірина***  
**Інститут екології Карпат НАН України**

# Вуглецева ємність території

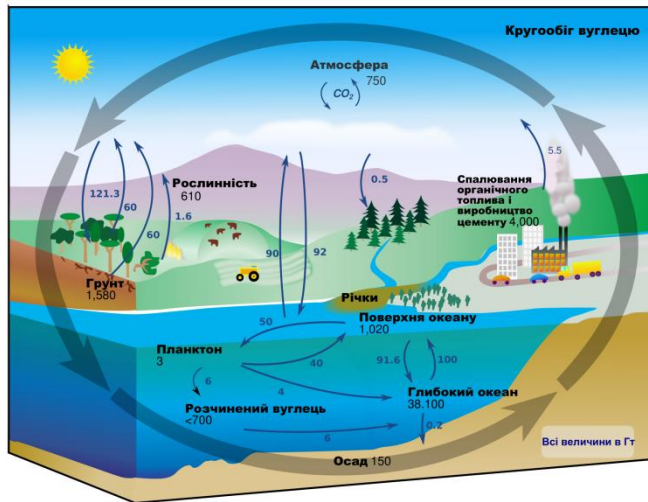


Близько половини кількості CO<sub>2</sub> , що надходить до атмосфери внаслідок спалювання викопного палива, зв'язується в результаті фотосинтезу наземної рослинності та океанічного фітопланктону та депонується в різних резервуарах .


Але, які можливості мають екосистеми в глобальному вимірі для депонування вуглекислого газу тобто, якою є вуглецева ємність біосфери?



# Вуглецева ємність території



Ймовірно, поглинати додаткову кількість CO<sub>2</sub> екосистемами будуть тільки доти, допоки збільшуватиметься фітомаса рослинного покриву і/або маса органічної речовини, що надовго виводиться з біотичного колообігу, наприклад депонується в ґрунті, болотах, торфовищах або в донних відкладах озер.



**АЛЕ**, коли межа зв'язування CO<sub>2</sub> екосистемами буде досягнута, швидкість приросту вмісту CO<sub>2</sub> в атмосфері збільшиться щонайменше у два рази. Це відбудеться навіть у тому випадку, якщо антропогенні викиди перебуватимуть на теперішньому рівні.

# Вуглецева ємність території



Натепер “вуглецева ємність” океану вже досягла межі депонування надлишкових кількостей  $\text{CO}_2$ , що встановлено прямими спостереженнями (Canadell, Quere, Raupach et al, 2007).

Збільшити кількість зв'язування антропогенного  $\text{CO}_2$  можна лише за рахунок наземних екосистем, зокрема природних чи штучно створених у живій фітомасі та ґрунтах.





# Вуглецева ємність території

Вуглецева ємність території – це її потенційна здатність до зв'язування та утримування атмосферного  $\text{CO}_2$  на тривалий час в різних компонентах наземних екосистем: живій фітомасі, мертвій деревині, ґрунті

Ця здатність детермінована комплексом абіотичних та біотичних факторів, може бути оцінена та регульована для потреб пом'якшення глобальних змін клімату в окремих регіонах



# Вуглецева ємність і екологічні послуги

➤ Узагальнюючим (інтегральним) параметром глибини антропогенної трансформації циклу Карбону окремих регіонів вважають зменшення величини сучасного депонування вуглецю, тобто зменшення потенційної вуглецевої ємності території, детермінованої абіотичними екологічними факторами

➤ Вуглецева ємність є важливою екосистемою послугою як на локальному так і на регіональному рівнях, оскільки може бути достатньо точно **розрахована** та **використана** для ідеї «вуглецевих кредитів» - компенсації понаднормових викидів CO<sub>2</sub> за рахунок його секвестрування.

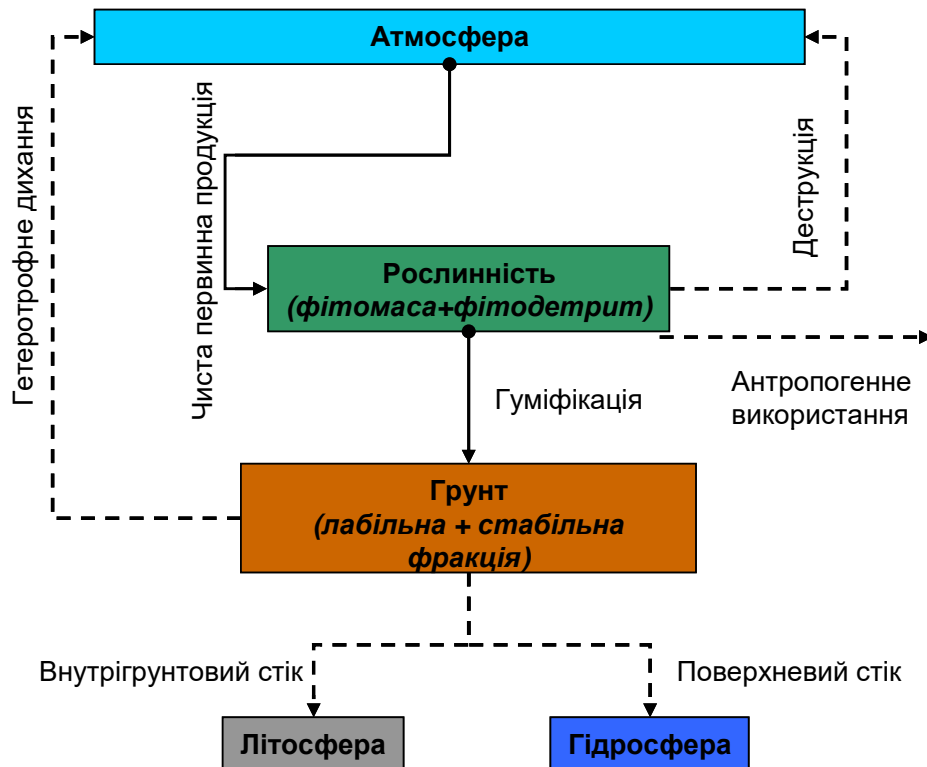
# Вуглецева ємність лісових екосистем

- **Визначальною біосферною функцією лісових екосистем є зв'язування вуглекислого газу атмосфери і депонування його на тривалий час у стовбуровій деревині та органічній речовині ґрунтів.**
- *Щорічне депонування Карбону в бореальних лісах планети оцінюється в  $0,08 - 44,0 \text{ т С га}^{-1} \text{ рік}^{-1}$*

**Основою оцінки вуглецевої ємності лісів на регіональному рівні є встановлення потенційних запасів органічного Карбону в трьох основних резервуарах лісових екосистем, де атмосферний Карбон акумулюється на тривалий період:**

- фітомаса деревного ярусу,
- запаси мертвої деревини та
- запаси органічної речовини у підстилці та ґрунтовому профілі.

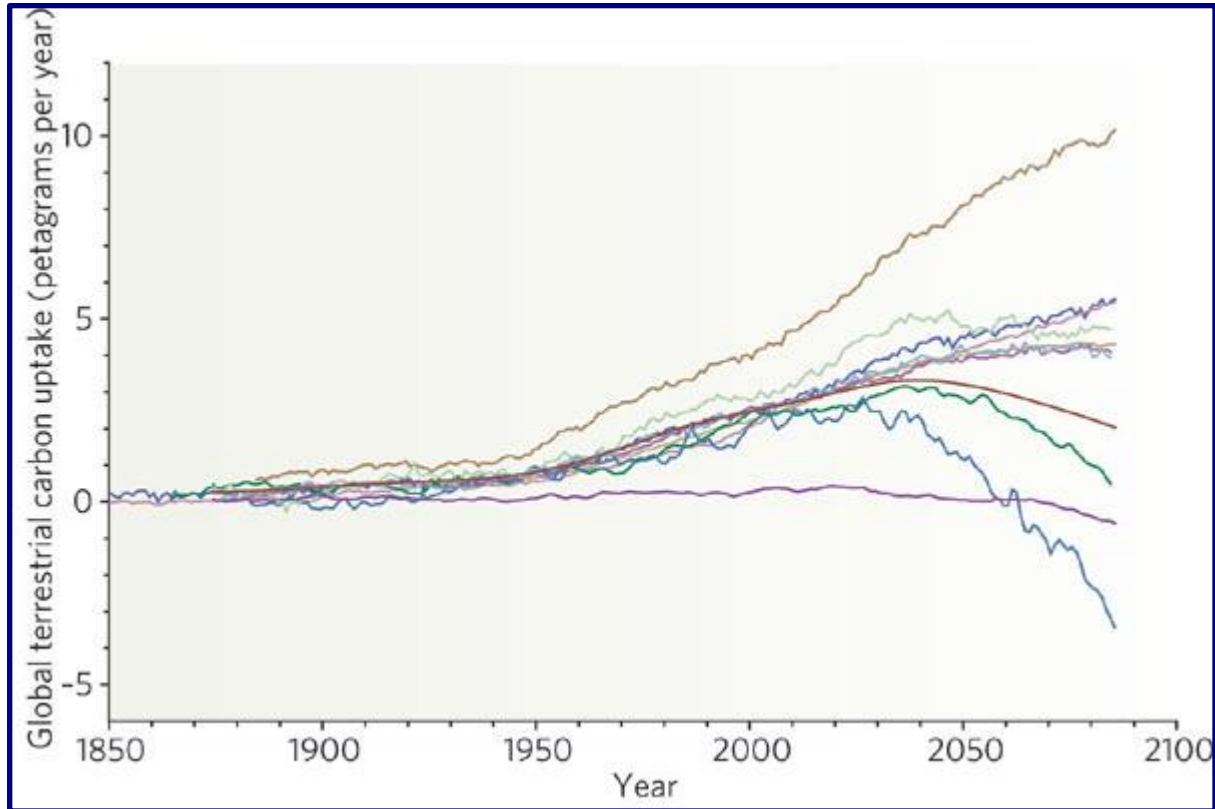
# Складові резервуарів та потоків циклу Карбону в лісових екосистемах



Пул органічної речовини забезпечується взаємодією різних процесів: - фотосинтетичною асиміляцією (**NPP**), мінералізацією (**HR**), гуміфікацією (**Hum**), геохімічною міграцією (**Lit**) (**Hyd**), антропогенним використанням (**Anth**)

Співвідношення різних статей балансу характеризує роль екосистем у регіоні: як джерела стоку↓ чи емісії  $\text{CO}_2$ ↑





## Динаміка депонування атмосферного Карбону ( $10^{15}$ г С за рік) наземними екосистемами за 11-ма різними моделями

(за Martin Heimann, Markus Reichstein [Terrestrial ecosystem carbon dynamics and climate feedbacks](#) // *Nature*. 2018. V. 451. P. 289–292)

# Продовжується дискусія щодо біосферної ролі пралісів...



**Вважають, що зв'язування CO<sub>2</sub> в старовікових лісах зрівноважується його виділення за рахунок гетеротрофного дихання деструкторів органічної речовини (баланс вуглецю  $\approx 0$ ).**

**Аналіз великого масиву даних для бореальних лісів Північної півкулі показав, що вони продовжують депонувати більше вуглецю, ніж вивільняти.**

**Займаючи біля 15% від загальної площі усіх лісів, старовікові ліси можуть забезпечувати зв'язування  $\approx 10\%$  від загальної кількості CO<sub>2</sub> усіма лісами планети.**

*Sebastiaan Luyssaert, E.-Detlef Schulze, Annett Börner, Alexander Knohl, Dominik Hessenmöller, Beverly E. Law, Philippe Ciais, John Grace. [Old-growth forests as global carbon sinks](#) // Nature. 2008. V. 455. P. 213–215.*

# Проблеми регіональних оцінок вуглецевої ємності

## Сучасний стан досліджень глобальних оцінок запасів та потоків Карбону в лісових екосистемах є недостатнім для довготермінового прогнозування:

- якщо 60-ті роки минулого століття на планетарному рівні запаси Карбону відрізнялися на порядок від 4 до  $41 \cdot 10^{15}$  т С (Müller, 1961), то через 35 років вони зменшившись вчетверо, зберегли десятикратний перепад ( $1 \cdot 10 \cdot 10^{15}$  т С), а роль лісових екосистем в глобальних біосферних циклах оцінюється від від'ємної (Woodwell et al, 1998) до позитивної (Кобак, 1996).
- За даними Інституту прикладного системного аналізу (*International Institute for Applied Systems Analysis, Laxenburg, Austria* [www.iiasa.ac.at](http://www.iiasa.ac.at)) на сучасному етапі наукових досліджень рівень невизначеностей основних компонентів балансу вуглецю NPP та HR не перевищує 5-15%, тоді як NEP – 35-40%
- Ці протиріччя та невзначеності обумовлені дефіцитом інформації про фактичну біотичну і екосистемну продуктивність лісів, різноманітністю методів їх оцінок та некоректними способами екстраполяції показників, отриманих на пробних площах на лісовкриті території.

***Наш досвід стосується*** оцінка повного балансу Карбону для найбільш поширених типів лісових екосистем Українських Карпат та встановлення невизначеностей та ймовірних похибок, що обмежують достовірність регіональних оцінок та величину «вуглецевої ємності» території для успішного управління проектами з помякшення наслідків змін клімату.

### **Методологія оцінки повного балансу вуглецю**

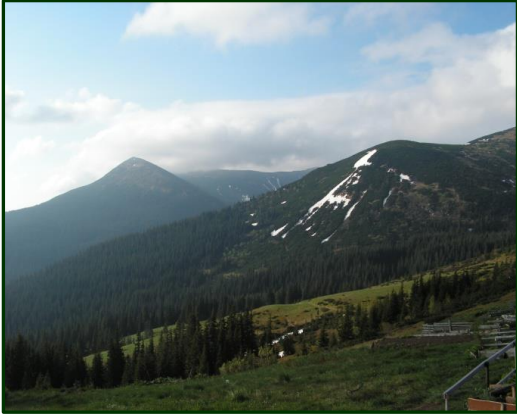
базувалася на системному поєднанні методів, які враховують:

- інтенсивність потоків та динаміку резервуарів вуглецю з використанням інформації, що описує природні ландшафти регіону,
- моніторингових досліджень на постійних пробних площах,
- регіональних моделей різного порядку.

Прямі вимірювання потоків використовувалися для параметризації математичних моделей, інверсного програмування та верифікації отриманих результатів.



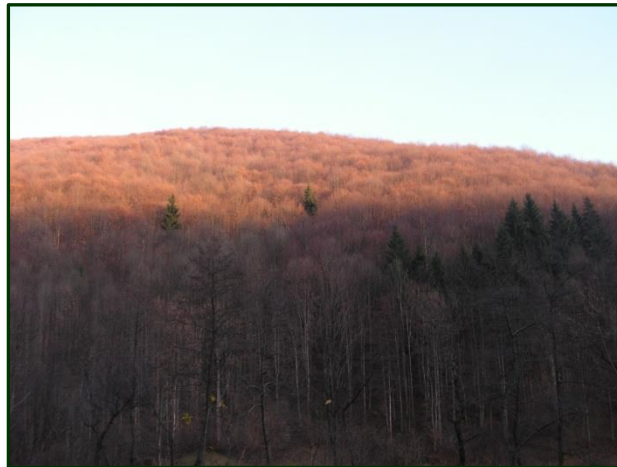
# Основні лісові типи екосистем



**Природні ялинові ліси**



**Вторинні штучні ялинові ліси**



**Букові ліси**

# Рівняння для оцінки запасів та потоків Карбону

## Жива фітомаса

### Деревний ярус

$$R_{v(\dots)} = a_0 \cdot A^{a_1} \cdot B^{a_2} \cdot \exp(a_3 \cdot A) \quad (1)$$

$$R_{v(\dots)} = a_0 \cdot A^{a_1} \cdot B^{a_2} \cdot P^{a_3} \cdot \exp(a_4 \cdot A + a_5 \cdot P) \quad (3)$$

$$R_{v(\dots)} = a_0 \cdot B^{a_1} A^{(a_2 + a_3 \cdot P + a_4 \cdot P^2)} \quad (4)$$

де  $A$  – вік, років  
 $B$  – бонітет  
 $P$  – відносна повнота

### Чиста первинна продукція

$$\overline{V_{ag}} = dGS(R_{ab} + R_{bl} + R_{us}) + \sum_i \left( dM R_i + Harv R_i + \frac{GS R_i}{Turn_i} \right)$$

де -  $dGS$  чистий приріст стовбурної деревини,  $m^3 \text{ га}^{-1}$  за рік;  
 $dM$  – природний відпад,  $m^3 \text{ га}^{-1}$  за рік  
 $R_i$  – вирази для розрахунку фракцій фітомаси  
 $Turn_i$  – час існування фракцій

### Підлісок

$$R_{uc} = 0,45(1,311P^2 + 2,561P - 0,0263) m$$

$P$  – повнота деревостан  
 $m$  – коефіцієнт, що залежить від віку переважаючої породи

### Підріст

$$R_{rg} = 0,45 k_1 k_2 K e^{k_3 \cdot h}$$

$K$  – кількість особин підросту на 1 га  
 $k_1, k_2, k_3$  – коефіцієнти  
 $h$  – висота см

## Відмерла фітомаса



“сухостій”

$$R_{dw} = 0,5 k D_w N/10$$

“захарашченість”

$$R_d = 0,5 k D$$

## Стовбуровий фітодетрит

$k$  – коефіцієнт фракції фітомаси  
 $D_w$  – запас на 1 га  
 $N$  - коефіцієнт складу насадження

$k$  – коефіцієнт залежності від породного складу  
 $D_w$  – запас відмерлої деревини на 1 га  
 $N$  - коефіцієнт складу насадження

## лісова підстилка

$$R_{lit} = [0.01 H_{asl} + 4.27] k_1 (k_2 A^2 + k_3 A + k_4) P$$

$H_{asl}$  – висота над рівнем моря  
 $A$  – вік деревостану  
 $P$  - повнота  
 $k_1, k_2, k_3$  коефіцієнти





# Проблеми які виникли в процесі ...

Потребували уточнення запаси фітодетриту та оцінки його частки у витратній частині вуглецевого балансу, особливо для розладнаних вторинних монодомінантних смеречників, де, за даними Львівського обласного управління лісового та мисливського господарства, накопичується від 51 до 101 м<sup>3</sup>·га<sup>-1</sup> лише стовбурового фітодетриту, у то й час як природний відпад у темнохвойних лісах не перевищує 5 м<sup>3</sup>·га<sup>-1</sup>.

**Недооцінювання запасів стовбурового фітодетриту** призводить до **зменшення величини NPP** та **неврахування його мінералізації** за рахунок процесів біохімічної трансформації.

*Стовбури хвойних дерев діаметром 30-40 см розкладаються впродовж 20-30 років, а частка вуглецю, яка вивільняється становить 50%.*



Недооціку запасів і потоків зумовлених стовбуровим фітодетритом варто зарахувати до **невизначеностей витратної частини балансу вуглецю.**

# Запас Карбону у компонентах фітомаси

Розрахунок запасів органічного карбону у фітомасі проведений за даними інвентаризації лісового фонду за **повидільною лісотаксаційною базою**

**Віковий діапазон** насаджень – 11-135 років. **Типи місцезростань:** С<sub>3</sub> та D<sub>3</sub>. **Класи бонітету** I<sup>c</sup>-IV. **Повнота** – 0,45-1,00.

**Похибка методу** регресійних рівнянь для розрахунку фітомаси - **15%**.

Ліси	Середня щільність запасів С <sub>орг</sub> , т га <sup>-1</sup>			
	Деревостан	Піднаметова рослинність	Стовбуровий фітодетрит	підстилка
<b>Смеречини,</b> <i>n=907</i>	132,5	1,1	0,7	5,7
<b>Смеречники,</b> <i>n=2107</i>	120, 4	1,0	0,9	4,3
<b>Бучини, n=416</b>	162, 0	4,5	0,4	2,4

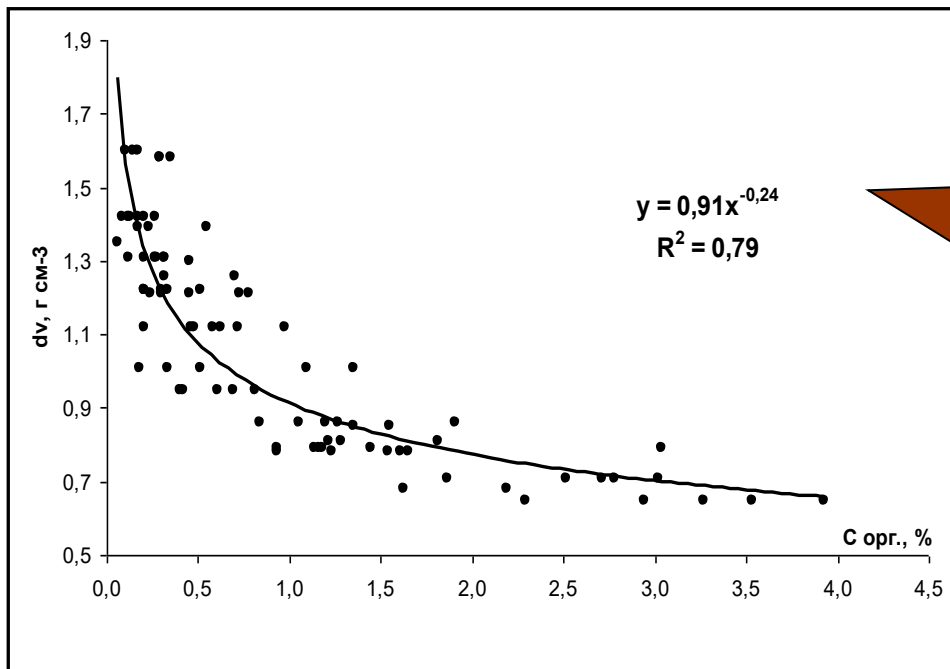
n - кількість проаналізованих лісотаксаційних виділів

## Грунтовий профіль

**Основні невизначеності** пов'язані з дефіцитом регіональних даних щодо щільності гумусованих ґрунтових горизонтів ( $d_v$ , г см<sup>-3</sup>) за наявності значного масиву інформації про вміст органічного вуглецю ( $C_{\text{орг}}$ , %).

### Шляхи вирішення:

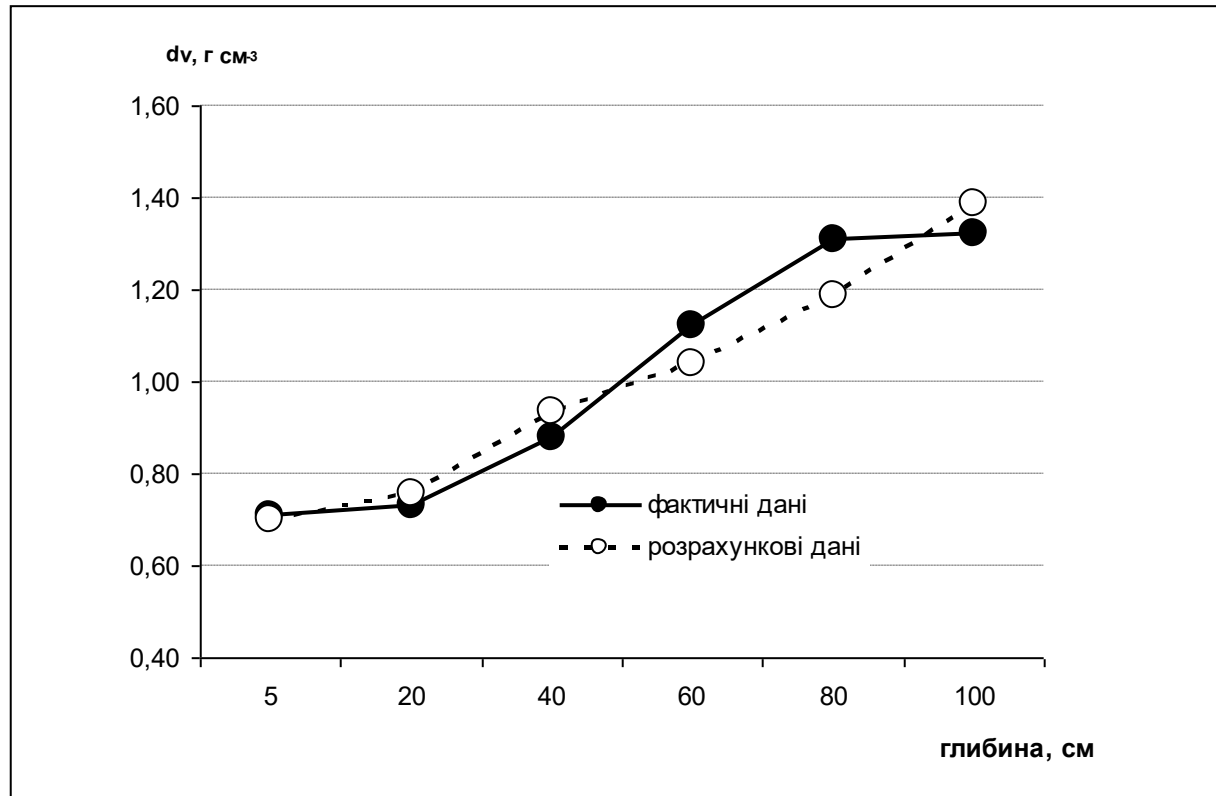
Використання системи рівнянь “від зворотного” – розрахунку щільності на підставі даних про вміст органічного вуглецю в окремих генетичних горизонтах (Косых, 2004)



### Апробація методу:

Однофакторна апроксимація  $d_v$  у залежності від вмісту  $C_{\text{орг}}$  ( $n=239$ )

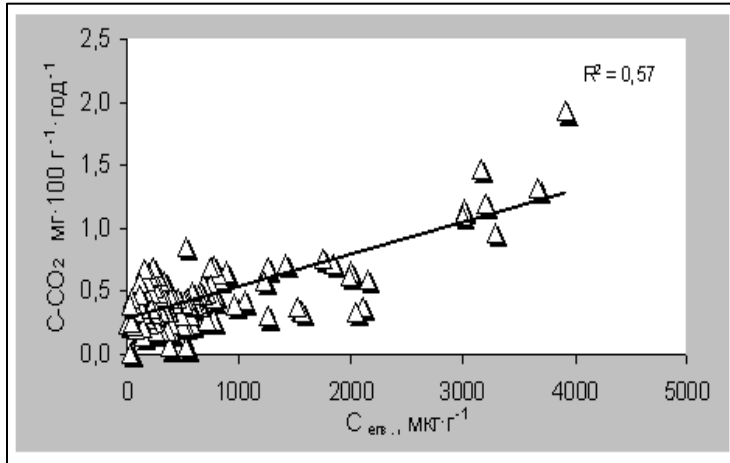
# Верифікація отриманих залежностей



На підставі однофакторної апроксимації  $C_{орг}, \% \rightarrow d_v, \text{г см}^{-3}$ , верифікації отриманих рівнянь, за даними фактичних вимірювань та врахуванні типу ЛРУ вдалося **зменшити невизначеності, пов'язані з розрахунками запасів  $C_{орг}$  в ґрунтовому профілі до 25%..**

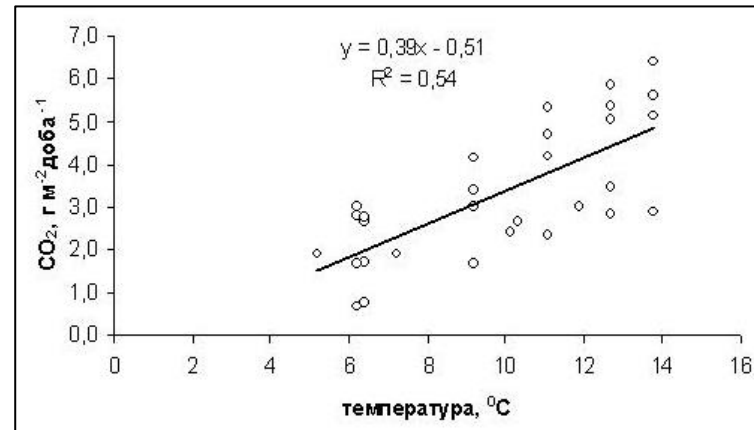


# Мінералізація органічного вуглецю



Оцінку емісії С-СО<sub>2</sub> за рахунок гетеротрофного дихання встановлювали за системою регресійних рівнянь які пов'язують кількість органічного вуглецю, який може потенційно мінералізуватися, температуру та вологість ґрунту.

**Формула для розрахунку інтенсивності гетеротрофного дихання**

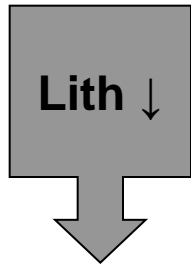
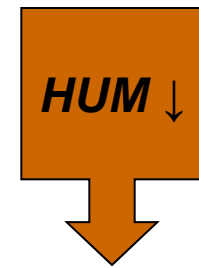


$$\uparrow I_{HR} = k_{евв} C-CO_2 [0.033 \exp^{0.295t}] d$$

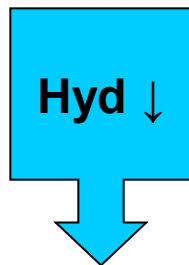
C-CO<sub>2</sub> – емісія СО<sub>2</sub> з поверхні ґрунтового профілю  
 кевв– коефіцієнт що відповідає Спм (Спм≈15Севв)  
 t – температура 0-20 см шару ґрунту  
 d – кількість діб

**Інтенсивність гуміфікації** визначалася експертними оцінками з врахуванням біохімічного складу рослинних решток та кліматичних характеристик території, отриманих раніше впродовж реалізації програми МАБ – ЮНЕСКО.

**Величина потоку, зумовленого процесами новоутворення гумусових сполук становить  $\approx 2,5-3,2\%$  вуглецю, що вивільняється в процесі деструкції.**

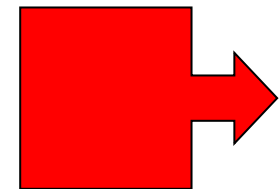


Для розрахунків "**витратної частини балансу**" – **внутрігрунтового стоку** було використано дані щодо водопроникності ґрунтів, кількості опадів та вмісту водорозчинного вуглецю. **Підхід потребує уточнення і верифікації...**



Інтенсивність потоку, зумовленого **поверхневим стоком** розраховано за рівняннями водної ерозії гірських територій, **потребує уточнення і обмежується "басейновим підходом"....**

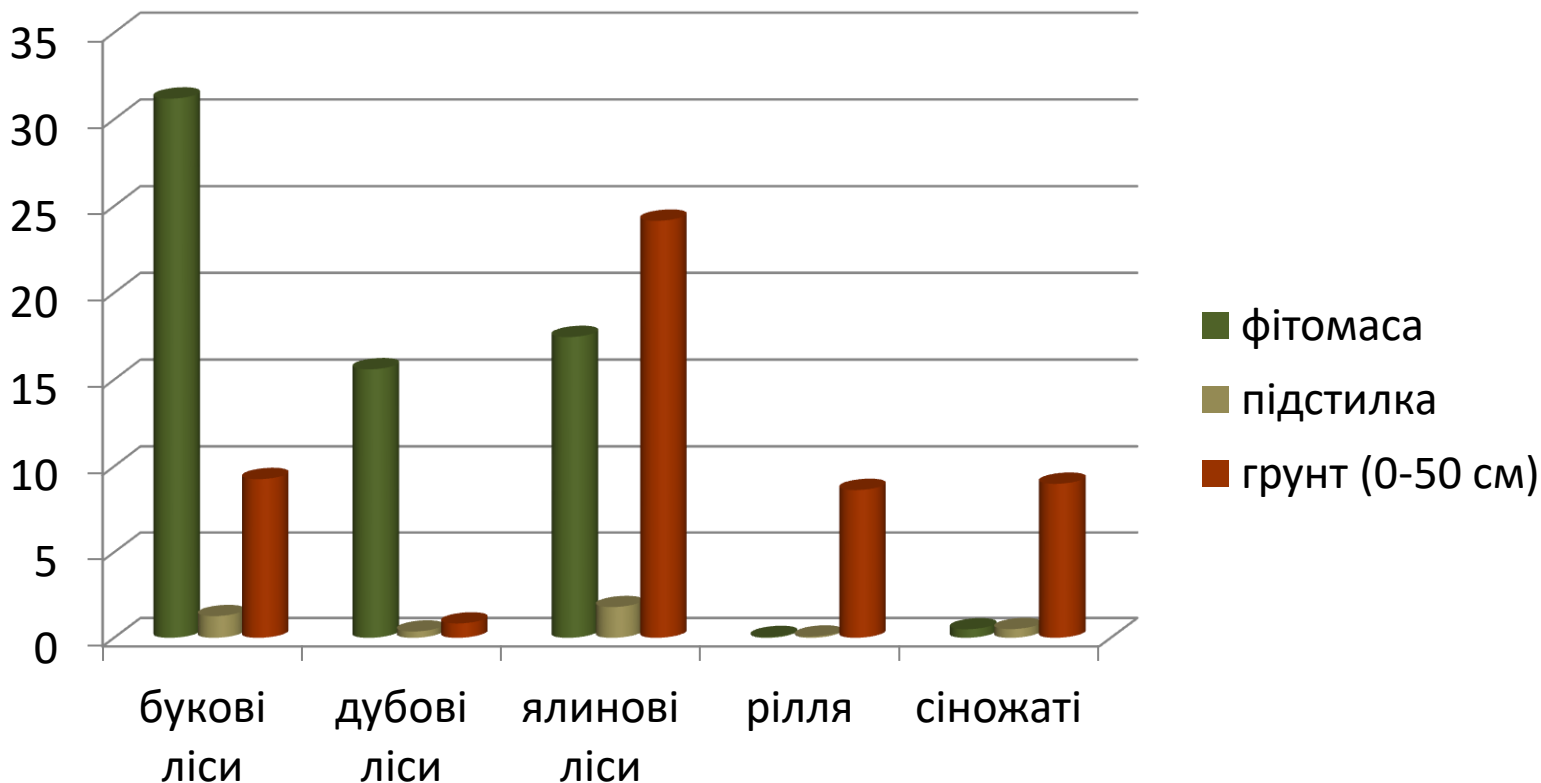
Інтенсивність **антропогенного вилучення** Карбону регламентується системою лісокористування



# Усереднені параметри балансу органічного Карбону в лісових екосистемах Українських Карпат

Складові балансу	Смеречини	Смеречники	Бучини
<i>Запаси вуглецю, т га<sup>-1</sup></i>			
<b>Фітомаса</b>			
деревостан	110,7	88,6	136,4
підріст, підлісок	1,2	1,9	2,3
надґрунтовий покрив	0,4	0,8	0,9
<b>Фітодетрит</b>			
сухостій	1,5	3,8	5,7
підстилка	4,2	4,3	3,6
<b>Ґрунт</b>			
лабільна фракція	7,4	8,8	6,9
стабільна фракція	184,5	110,2	99,8
<i>Інтенсивність потоків, т га<sup>-1</sup> за рік</i>			
(+) Чиста первинна продукція	2,62	2,95	3,87
(-) Гетеротрофне дихання	1,58	1,95	2,19
розклад стовбурового фітодетриту	0,03	0,06	0,10
розклад підстилки	0,67	1,08	0,22
розклад органічної речовини ґрунту	0,82	0,73	1,75
(+) Гуміфікація	0,03	0,06	0,07
(-) Внутріґрунтовий та поверхневий стік	0,06	0,09	0,16
<b>Чиста екосистемна продукція</b>	<b>1,02</b>	<b>0,96</b>	<b>1,59</b>
<i>Частка NPP, яка зумовлює депонування органічного вуглецю</i>	39	32	41

# Вуглецева ємність природних та антропогенних екосистем



Депоновані запаси органічного карбону в резервуарах, кг С/м<sup>2</sup>



# Підсумки

- Кількісний аналіз запасів вуглецю в резервуарах та інтенсивності потоків між ними свідчить, що NEP в річному балансі становить 30-40% NPP, що визначає величину **стоку** атмосферного вуглецю лісовкритих територій, еквівалентному  $1,54 \text{ т} \cdot \text{га}^{-1} \cdot \text{рік}^{-1}$  для бучин,  $1,02$  – смеречин і  $0,96$  – вторинних смеречників.
- Встановлена значна «**вуглецева ємність**» карпатського регіону, оскільки NEP лише вторинних ялиників гірських адміністративних районів Львівської області в 12-18 разів перевищує викиди вуглецю від стаціонарних та пересувних джерел за 2007 р.
- **Невизначеності**, пов'язані з оцінкою запасів фітомаси та NPP, становлять 15-18%, а втрат водорозчинного вуглецю за рахунок геохімічного стоку – 70-85%.
- **Невизначеності** запасів вуглецю у ґрунтовому профілі та потоку, зумовленого гетеротрофним диханням вдалося зменшити до 25-30%.
- **Прикладне значення**, Кіотський протокол оцінює додатково накопичений (секвестрований) вуглець як товар (15 \$ за 1 т секвестрованого вуглецю), тому отримані дані можна використовувати для експертної оцінки у разі проведення спеціальних лісгосподарських заходів, зокрема лісовідновлення не лише на лісових, але й на малопродуктивних деградованих сільськогосподарських землях карпатського регіону.

## Національна комплексна докторська програма з екологічної політики, менеджменту та техноекології

### Підстава для створення:

- Грантова угода ERASMUS+ project «INTENSE: Integrated Doctoral Program for Environmental Policy, Management and Technology» (586471-EPP-1-2017-1-EE-EPPKA2-CBHE-JP)
- Договір про співробітництво

### Базові установи:

- Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна
- Одеський державний екологічний університет
- Інститут екології Карпат Національної академії наук України

### Базові спеціальності:

101 Екологія

103 Науки про Землю

183 Технології захисту навколишнього середовища



A photograph of a large, dark tree trunk in a forest. The tree trunk is the central focus, showing a rough, textured bark. The background is a dense forest of thinner trees with green foliage. The ground is covered with fallen brown leaves. The text 'Дякую за увагу!' is overlaid in the upper left quadrant in a blue, outlined font.

Дякую за увагу!

Зимова академія "Екологічна безпека ЄС та України у контексті глобальних кліматичних" 14-18 грудня 2020 р.