

# **Эмиссия и баланс углерода в лесных экосистемах умеренной зоны в контексте современных климатических изменений**

**Курганова И.Н.**

**Институт физико-химических и биологических проблем  
почвоведения РАН, Пущино**

# **План лекции:**

- ❖ Роль лесных экосистем РФ в глобальном цикле углерода;**
- ❖ Анализ современных климатических трендов в регионе южного Подмосковья;**
- ❖ Оценка эмиссии  $\text{CO}_2$  из почв лесных экосистем (наземный мониторинг);**
- ❖ Определение чистой первичной продукции лесных экосистем (спутниковый мониторинг);**
- ❖ Оценка баланса углерода в лесных экосистемах южного Подмосковья и его взаимосвязь с климатом.**

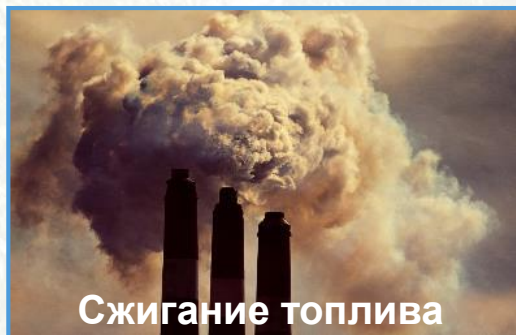


# Соотношение между источниками и стоками С в 2010-2019 гг.

**Источники**  
Гт С/год

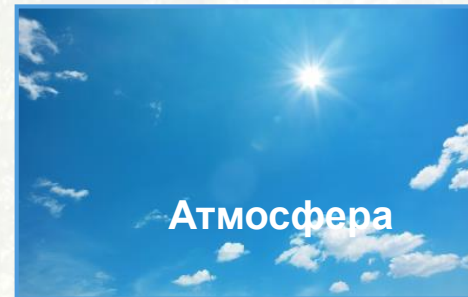
=

**Стоки**  
Гт С/год

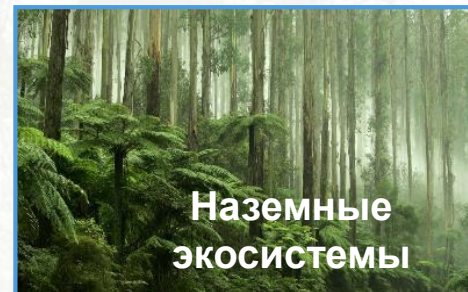


86%  
**9.4**

46%  
**5.1**

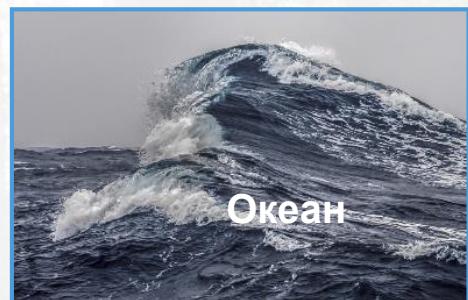


31%  
**3.4**



14%  
**1.6**

23%  
**2.5**



**Дисбаланс С: 0.05 Гт С/год (0.4%)**

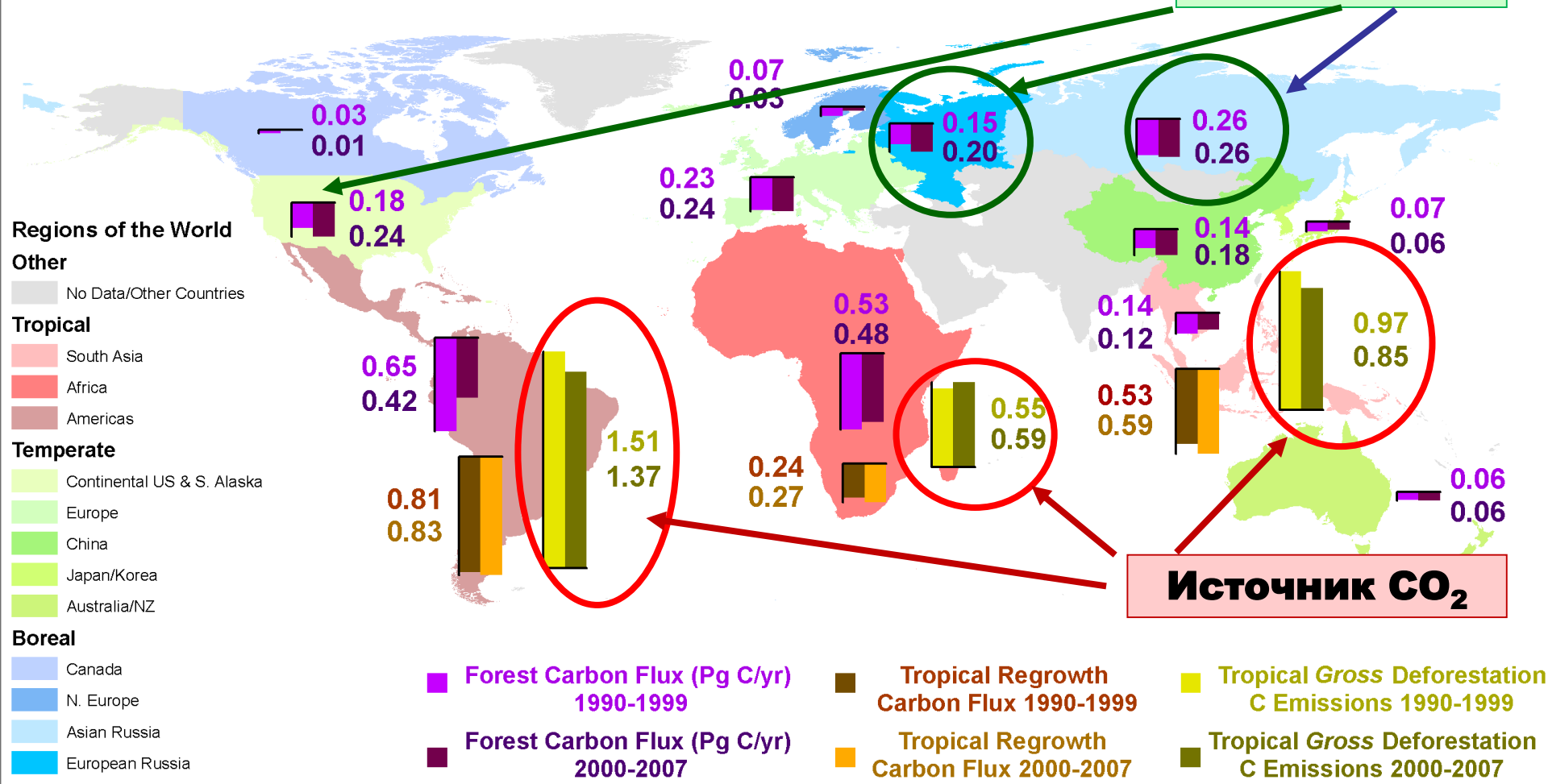
(разница между источниками и стоками)

Источник: *Global Carbon Budget 2020; Friedlingstein et al., 2020*

# Глобальный сток С в лесные экосистемы

27% индустриальных выбросов CO<sub>2</sub>

Сток CO<sub>2</sub>



Источник: Pan et al., 2011 (Science)

# Глобальный бюджет углерода в лесных экосистемах мира (Гт С/год)

Регион	1990-1999	2000-2007	1990-2007
Бореальные леса	0.50±0.08	0.50±0.08	0.50±0.08
Умеренные леса	0.67±0.08	0.78±0.09	0.72±0.08
Нетронутые тропические леса	1.33±0.35	1.02±0.47	1.19±0.41
<b>Лесные экосистемы мира</b>	<b>2.50±0.36</b>	<b>2.30±0.49</b>	<b>2.41±0.42</b>
<b>Россия (~20% всех лесов)</b>	<b>0.41</b>	<b>0.46</b>	<b>0.44 (18%)</b>

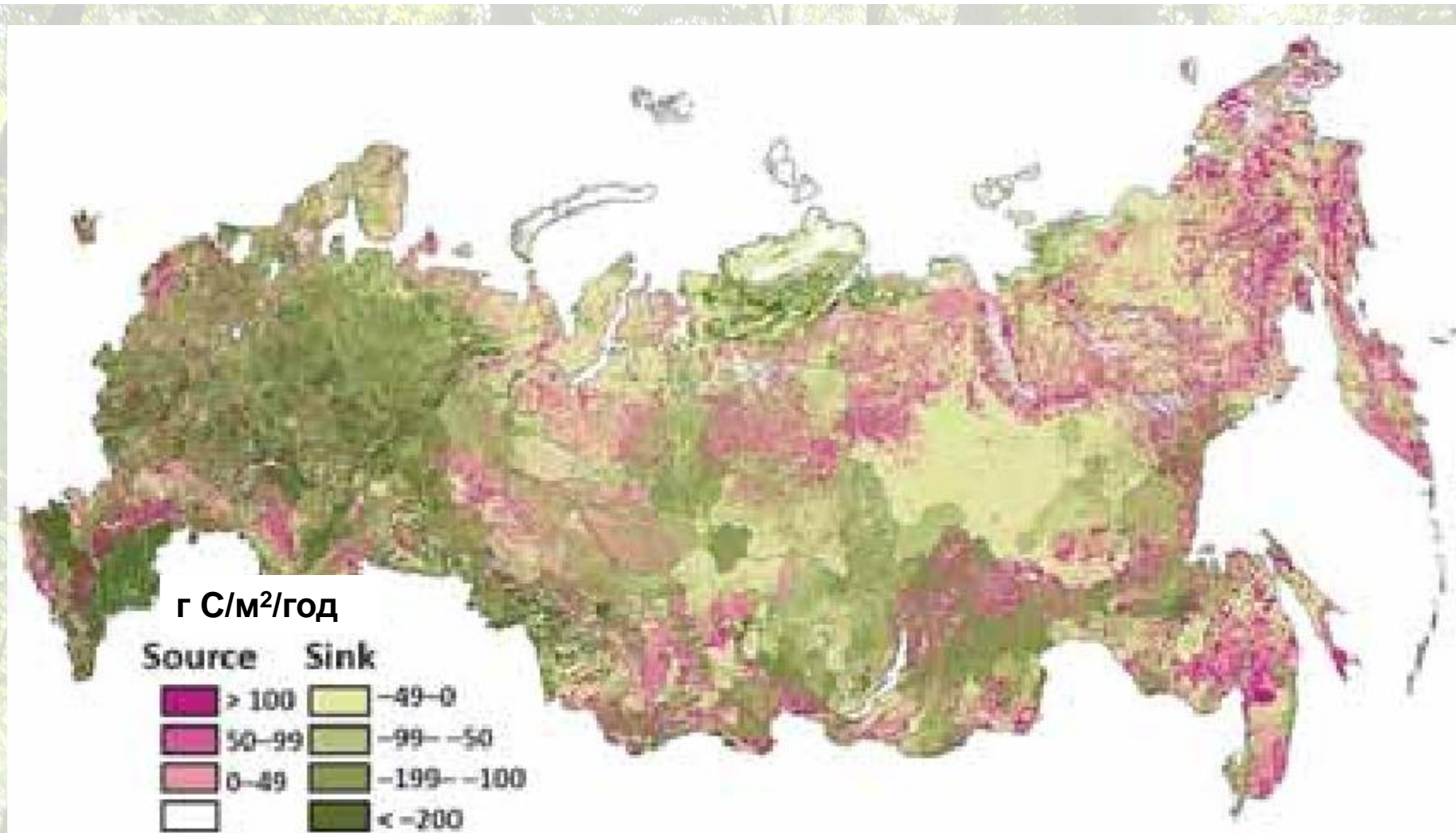
Источник: Pan et al., 2011; Science

# Сравнение оценок баланса углерода в наземных экосистемах России

Методологический подход	Баланс С, Гт С/год
Ландшафтно-экосистемный	<b>0.76</b>
На базе прямых измерений Eddy-covariance	<b>0.71</b>
Расчетный (12 моделей)	<b>0.69</b>
<b>Средний баланс (сток) С = 0.72 Гт С/год</b>	

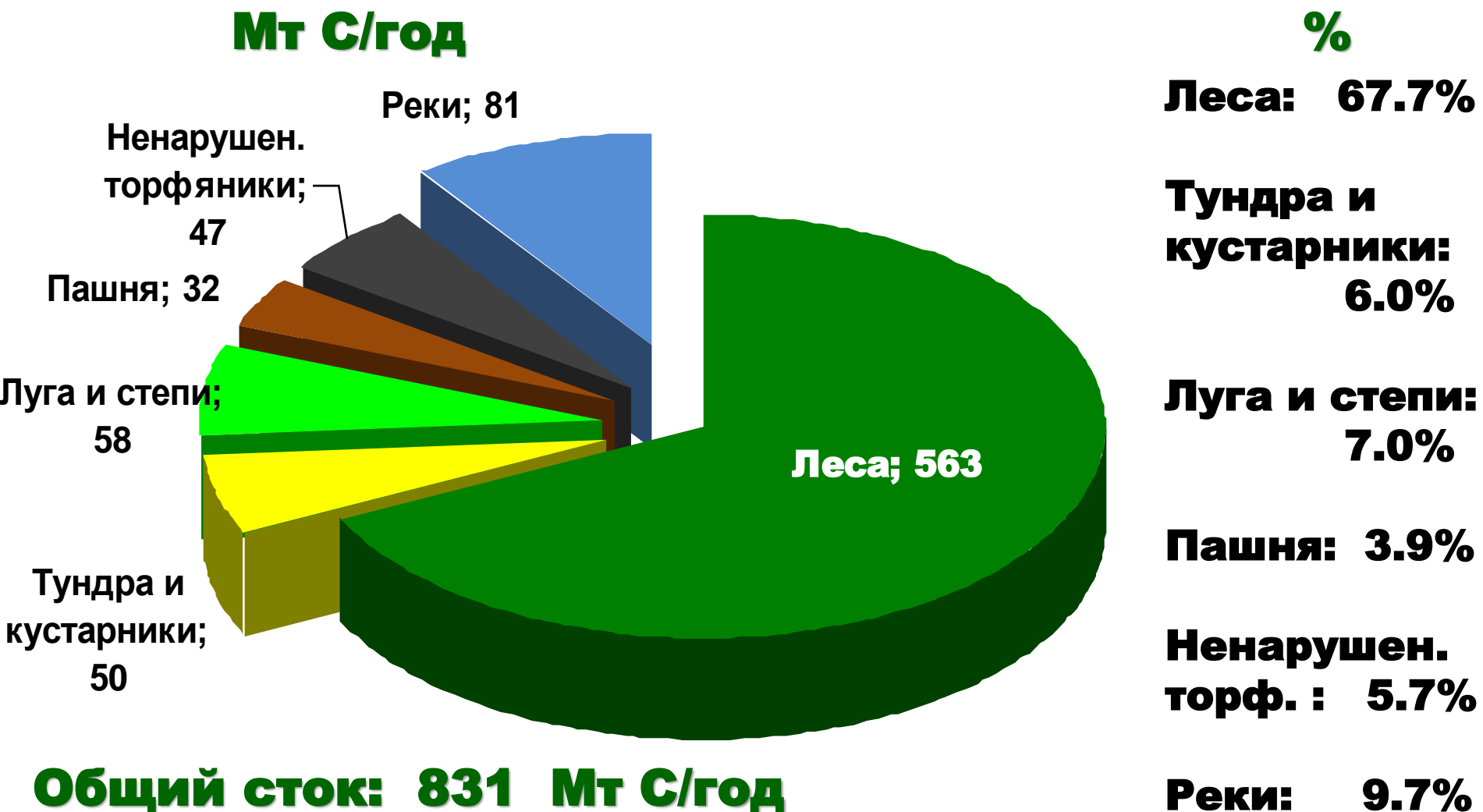


# Баланс углерода на территории России (2009 г.)



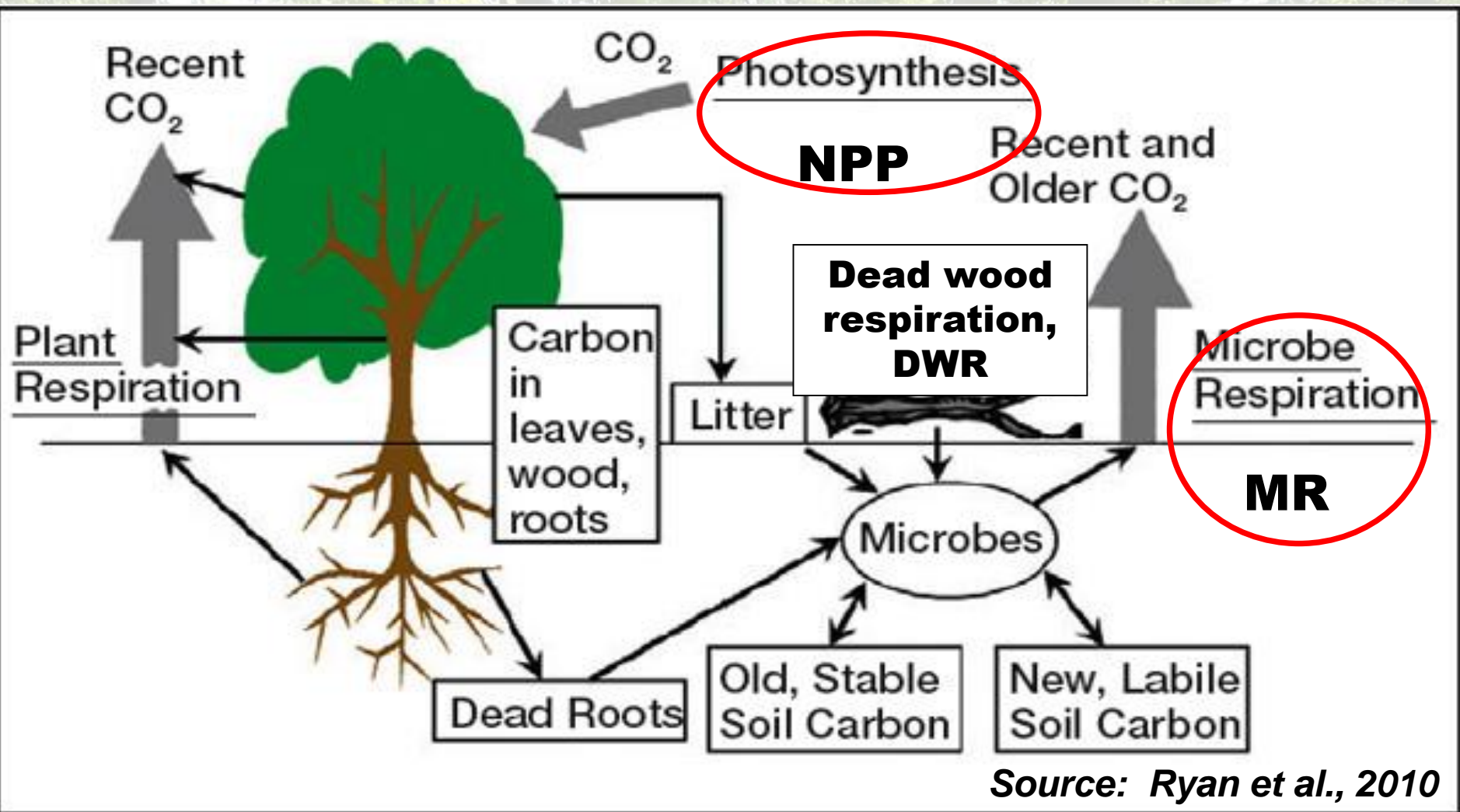
(Dolman et al., 2012)

# Распределение стока углерода на территории России в 2001-2004 гг.





# Баланс углерода в лесных экосистемах



$$\text{C-balance (NEP)} = \text{NPP} - [\text{MR} + \text{DWR}]$$

**Оценка MR (дебатируется): 1/2 – 2/3 TSR ???**

# Регион исследований – южное Подмосковье:

Климат:

**умеренно-континентальный**



Регион:

ЦФО

Юг Подмосковья

Среднегод. Т: **+4.7°C**

**+4.6°C**

Осадки: **625 мм/год**

**671 мм/год**

▲ Регион исследований ( $54^{\circ}N$   $37^{\circ}E$ )

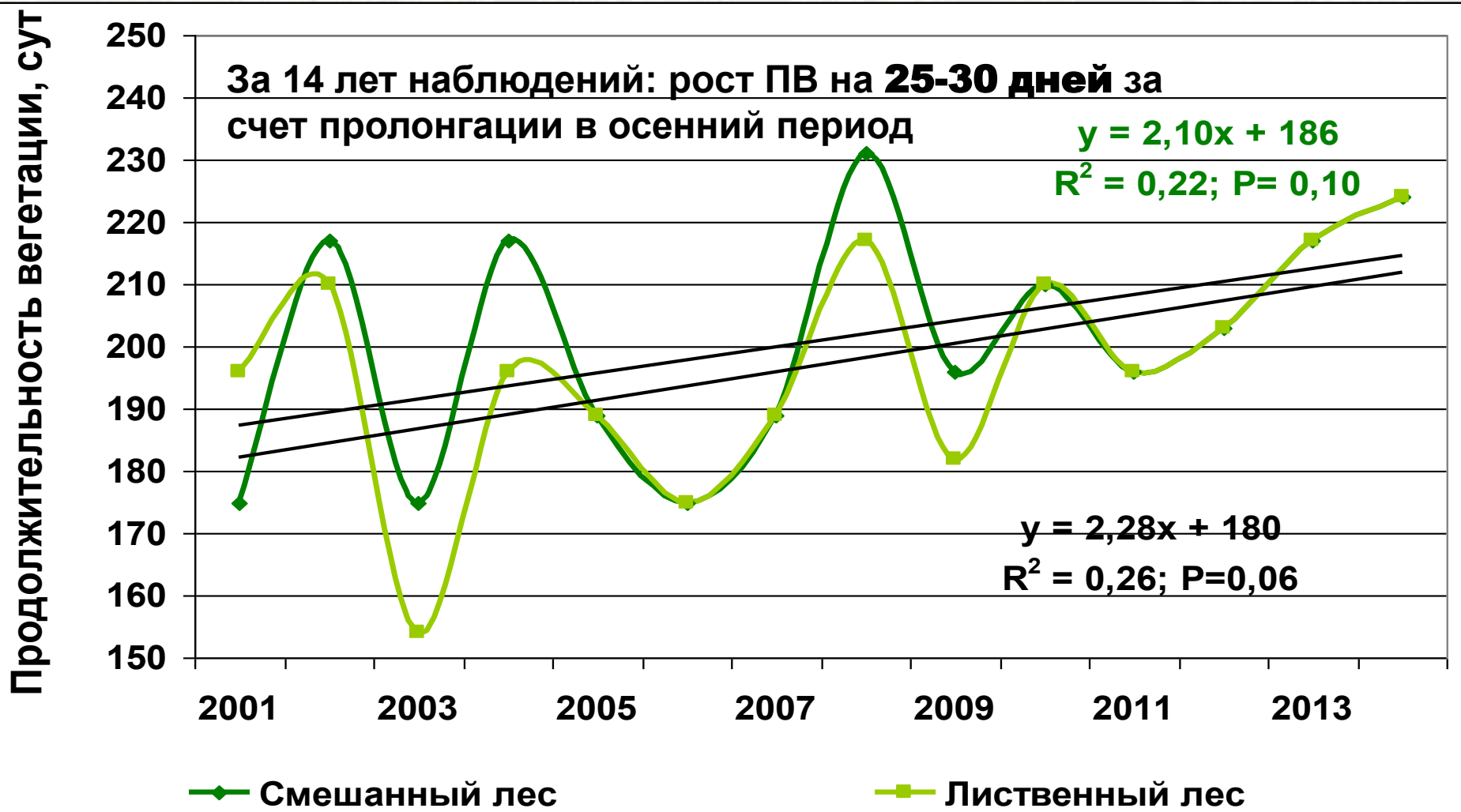
# Анализ климатических трендов в регионе южного Подмосковья

Параметр	Период	1973–2018 (46 лет)			1998–2018 (21 год)		
		a	R <sup>2</sup>	P	a	R <sup>2</sup>	P
<b>T<sub>в</sub>, °C</b>	<b>Год</b>	<b>0.42</b>	0.29	<b>&lt;0.001</b>	<b>0.44</b>	<b>0.21</b>	<b>0.04</b>
	<b>Зима</b>	<b>0.54</b>	0.08	<b>0.05</b>	0.57	0.02	ns
	<b>Весна</b>	<b>0.32</b>	0.09	<b>0.04</b>	0.58	0.10	ns
	<b>Лето</b>	<b>0.53</b>	0.28	<b>&lt;0.001</b>	0.31	0.02	ns
	<b>Осень</b>	<b>0.34</b>	0.11	<b>0.02</b>	0.56	0.09	ns
<b>∑ос, мм</b>	Год	-22.5	0.07	ns	-43.6	0.05	ns
	Зима	-3.3	0.014	ns	-0.34	0.00	ns
	Весна	1.3	0.00	ns	11.7	0.02	ns
	Лето	-12.1	0.06	ns	-34.9	0.09	ns
	Осень	-8.7	0.05	ns	-21.5	0.05	ns
<b>ГТК</b>	<b>Лето</b>	<b>-0.12</b>	<b>0.13</b>	<b>0.01</b>	<b>-0.25</b>	<b>0.11</b>	ns
<b>ПснП, число дней</b>	Зима	-2.4	0.02	ns	<b>-17.8</b>	<b>0.22</b>	<b>0.03</b>

(Kurganova et al., 2021)



# Изменение продолжительности вегетации в 2001-2014 (по значениям NDVI в лесных ценозах)



(Kurganova et al., 2017)

# Лесные экосистемы

## (1) Приокско-террасный заповедник

**Смешанный лес** >130 лет

(4СЗЛ2АsO1Б, Дуб – ед.)

**Дерново-подзолистая  
супесчанная почва**



## (2) Опытно-полевая станция ИФХиБПП

**Вторичный лиственный лес**

~70 лет; 5OЗЛ2К,

Дуб, Береза – ед.;

**Серая лесная суглинистая  
почва**





# Определение общего дыхания почв ( $TSR = MR + RR$ )



- **Закрытый камерный метод, измерения 3–5 раз в месяц;**
- **Начиная с 1998 (непрерывно и круглогодично)**
- **Дыхание почв оценивали на суточном, месячном, сезонном и годовом уровнях осреднения.**

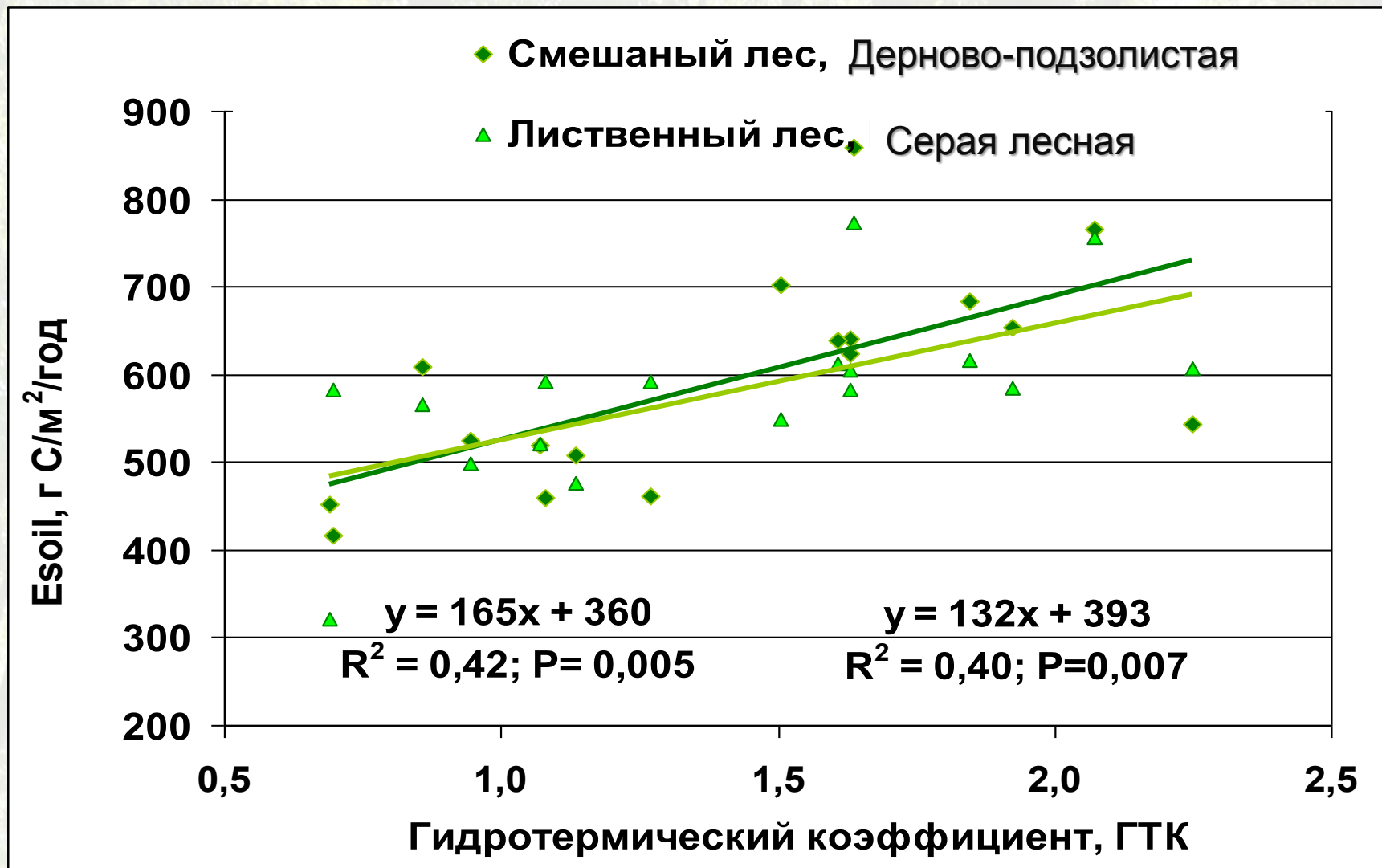


# Годовые потоки CO<sub>2</sub> из почв лесных ценозов: временные тренды за 1998-2014

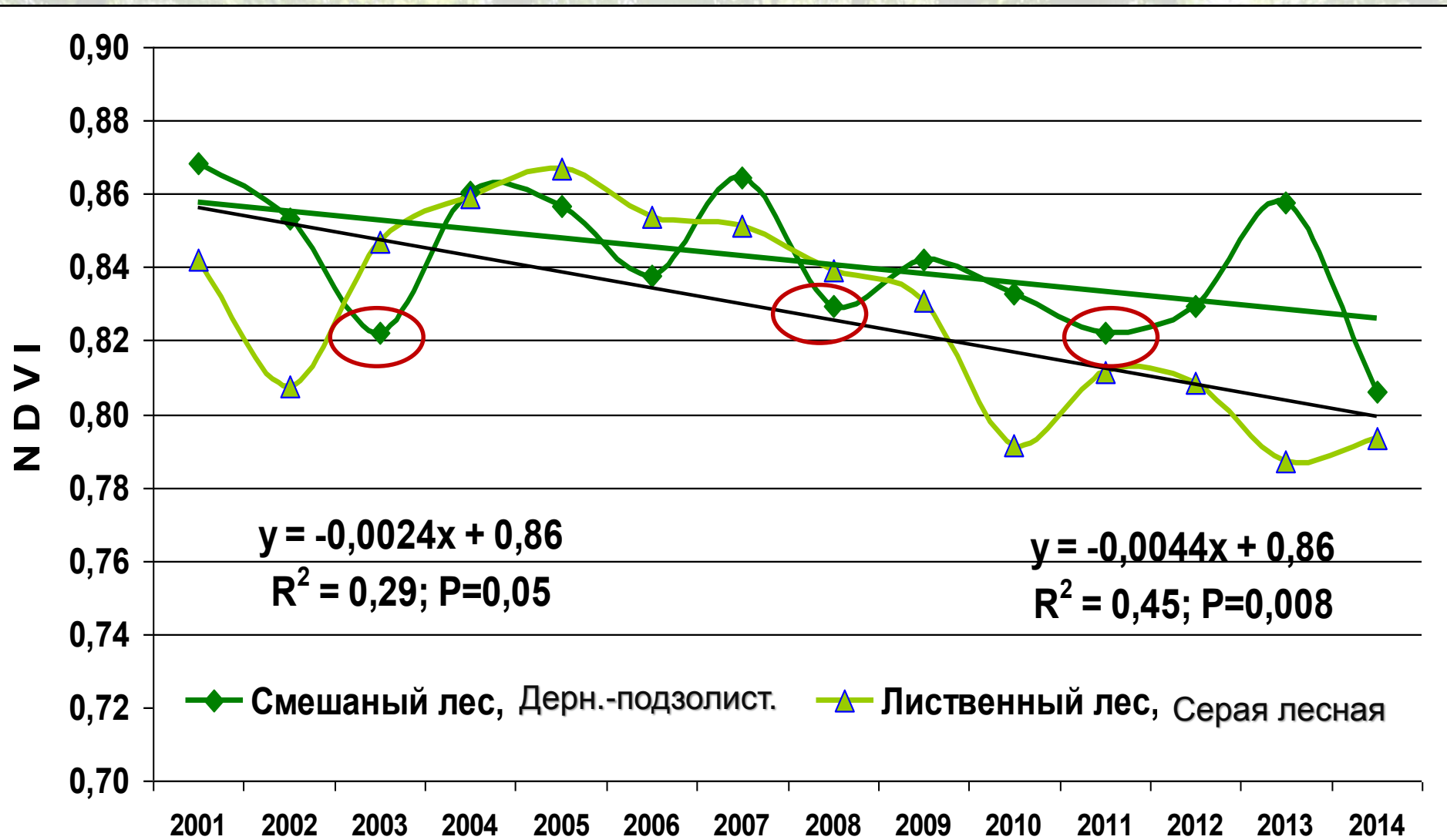


(Kurganova et al., 2017)

# Зависимость между годовыми потоками CO<sub>2</sub> из почв (Esoil) и ГТК за летний период

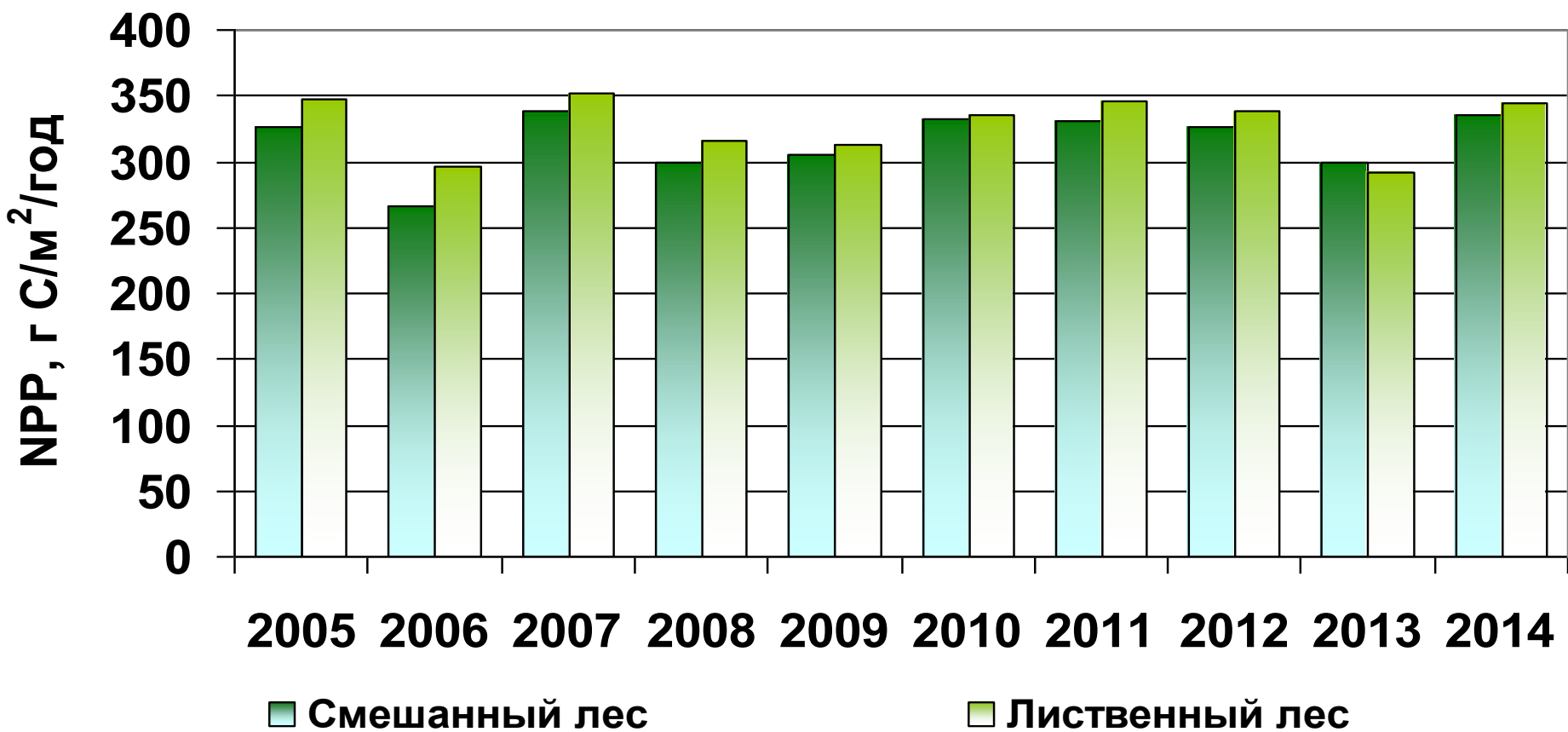


# Временные тренды средне-летних значений NDVI в 2001-2014 гг.





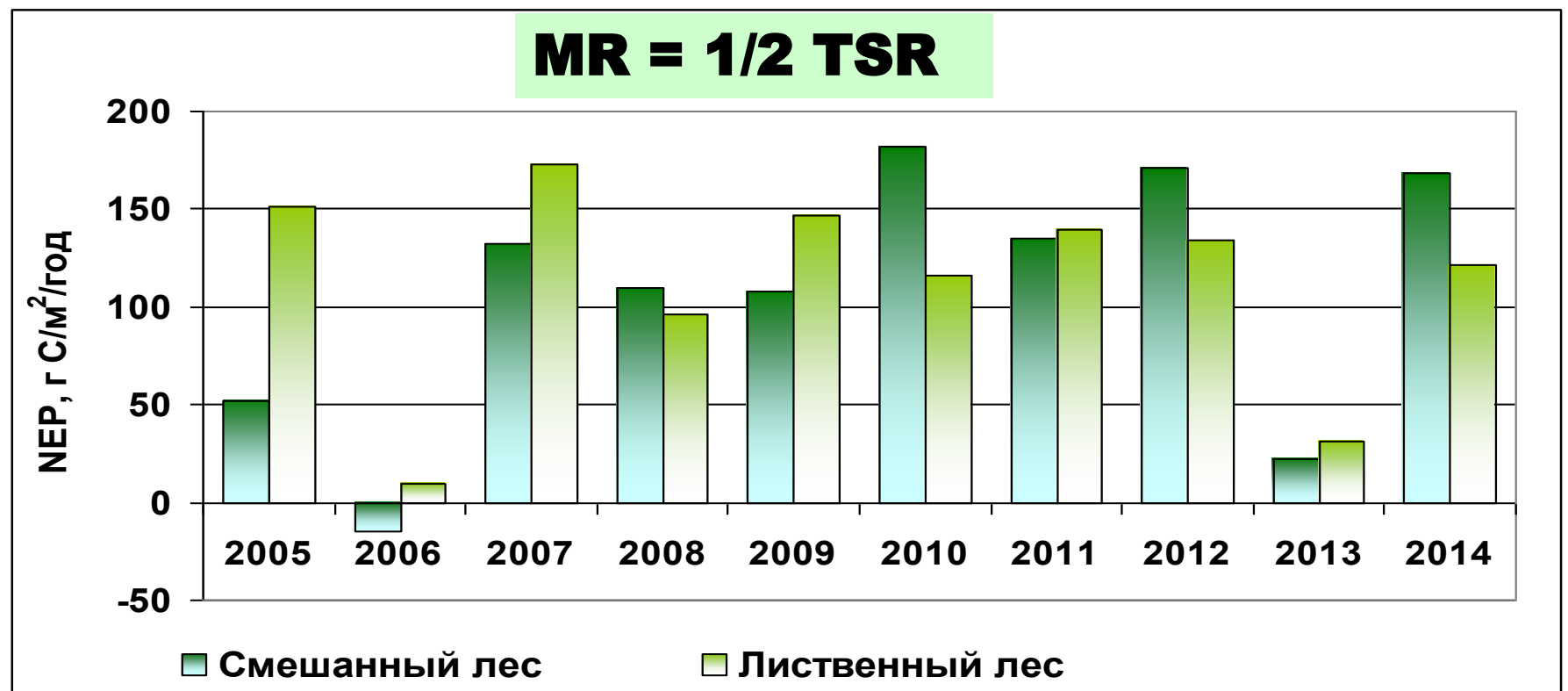
# Динамика значений NPP в лесных ценозах в 2005-2014 гг.



**NPP, г С/м²/год**  
Среднее **316**  
Min-Max **266 - 339**

**NPP, г С/м²/год**  
Среднее **328**  
Min-Max **291 - 352**

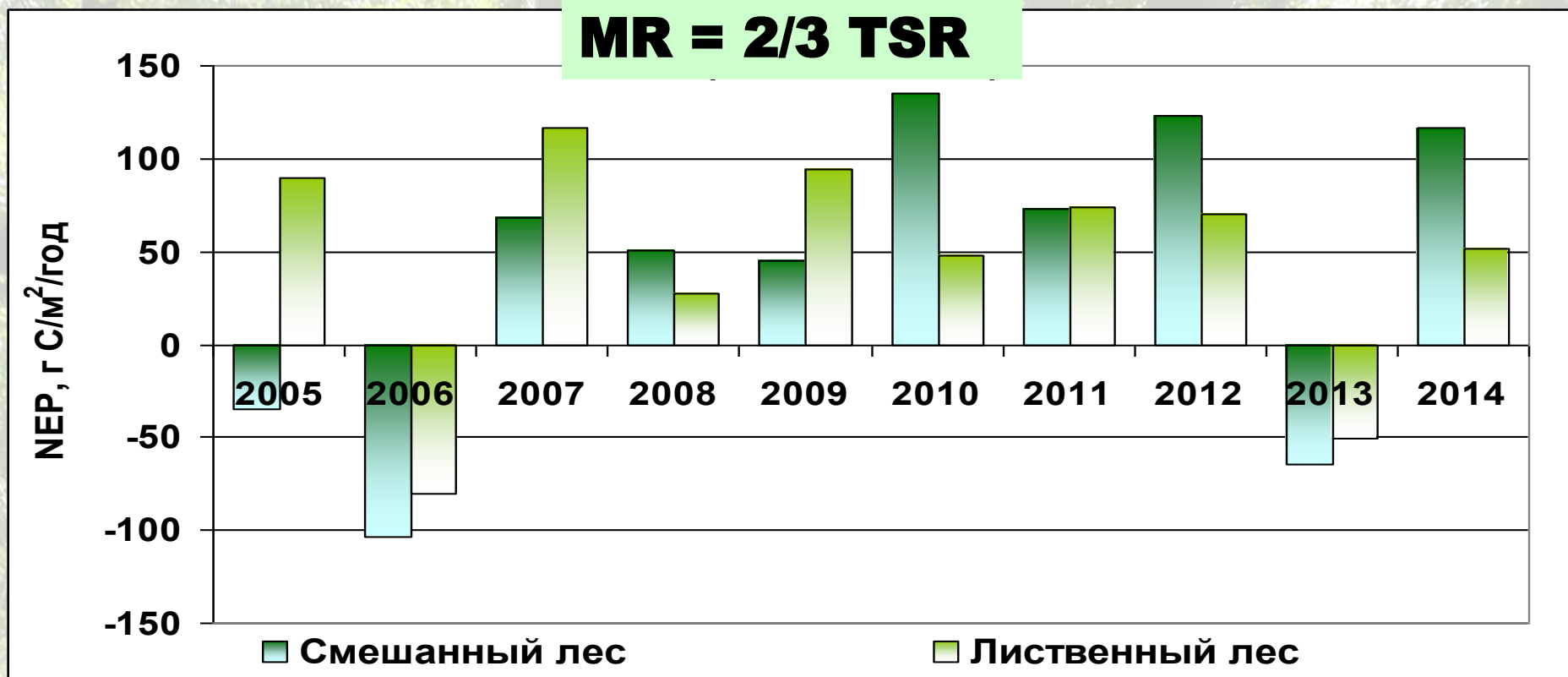
# Баланс углерода в лесных ценозах в теплый период года ( $NEP = NPP - MR_{warm}$ )



<b>NEP, г С/м<sup>2</sup>/год</b>	<b>Смешанный</b>	<b>Лиственный</b>
min	<b>-15</b>	<b>9</b>
max	<b>182</b>	<b>173</b>
<b>mean</b>	<b>107</b>	<b>112</b>

(Kurganova et al., 2017)

# Баланс углерода в теплый период года в лесных ценозах ( $NEP = NPP - MR_{warm}$ )



**NEP, г C/m²/год**

**Смешанный**

**Лиственный**

min

**-103**

**-80**

max

**135**

**116**

mean

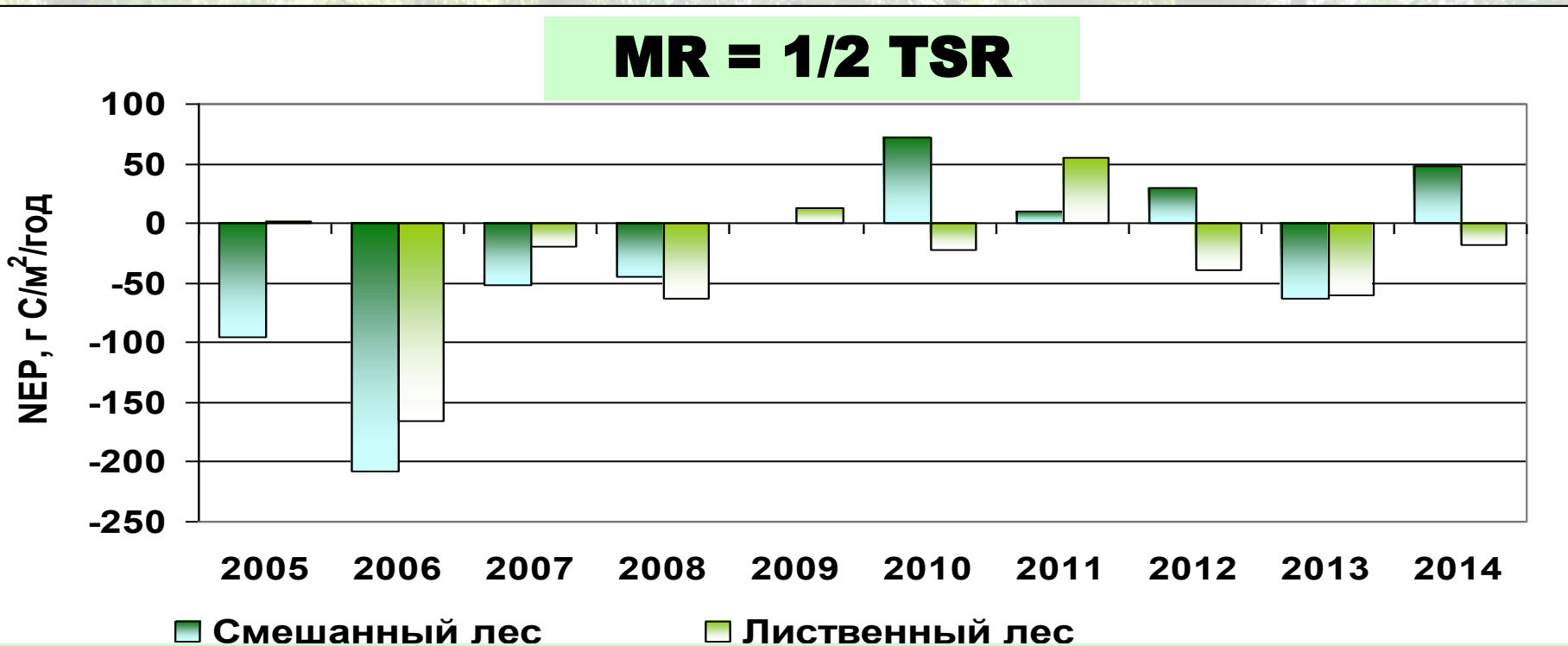
**41**

**44**



# Баланс углерода в лесных ценозах с учетом холодного периода

MR = 1/10 TSR для холодного сезона

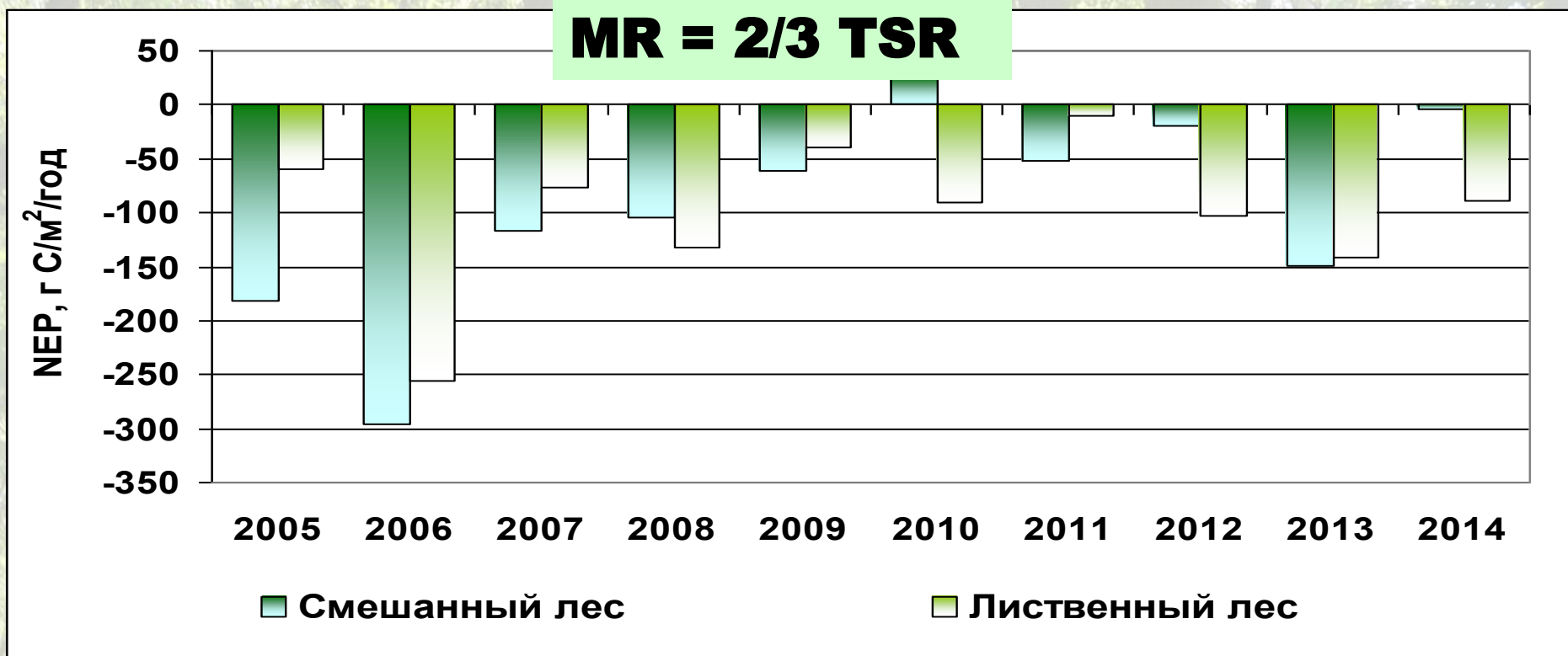


NEE, г C/м²/год	Смешанный	Лиственный
<b>Mean</b>	<b>-30</b>	<b>-32</b>
<b>Min</b>	<b>-208</b>	<b>-166</b>
<b>Max</b>	<b>72</b>	<b>55</b>

(Kurganova et al., 2017)

# Баланс углерода в лесных ценозах с учетом холодного периода

MR = 1/10 TSR для холодного сезона



**NEP, г С/м²/год**

**Смешанный**

**Лиственный**

**Mean**

**-96**

**-100**

**Min**

**-296**

**-255**

**Max**

**25**

**-10**

# Линейные регрессионные модели для оценки баланса С (NEP) за годовой и вегетационный периоды в зависимости от значений летнего ГТК

Расчетный параметр	MR=1/2TE <sub>CO2</sub>			MR=2/3TE <sub>CO2</sub>		
	Уравнение	R <sup>2</sup>	P	Уравнение	R <sup>2</sup>	P
<b>Смешанный лес, дерново-подзолистая почва</b>						
<b>NEP (год)</b>	-111x + 118	<b>0.50</b>	0.02	-127x + 75	<b>0.48</b>	0.03
<b>NEP (вегетац.)</b>	-89x + 225	<b>0.48</b>	0.03	-106x + 181	<b>0.44</b>	0.04
<b>Лиственный лес, серая лесная почва</b>						
<b>NEP (год)</b>	-77x + 71	<b>0.47</b>	0.03	-66x + 199	<b>0.42</b>	0.04
<b>NEP (вегетац.)</b>	-90x + 20	<b>0.47</b>	0.03	-78x + 148	<b>0.40</b>	0.05

x – значения летнего ГТК; R<sup>2</sup> – коэффициент детерминации; P – уровень значимости (F-тест).

(Kurganova et al., 2017)



# Потери C-CO<sub>2</sub> при разложении крупных древесных остатков в лесных БГЦ

по *k* минерализации

БГЦ	Запас КДО т С/га	K, год <sup>-1</sup>	Потери C-CO <sub>2</sub> ,	
			г С/м <sup>2</sup> /год	% от E <sub>soil</sub>
Смешанный	20.6±2.7	0.038	<b>79±14</b>	<b>13.9 ± 1.8</b>
Лиственный	4.4±0.6	0.066	<b>29±4</b>	<b>4.0 ± 0.7</b>

Согласно нашим экспертным расчетам эмиссионная активность КДО составляла от 4 до 14% от общего потока CO<sub>2</sub> из почв, превращая старовозрастные лесные экосистемы южного Подмосковья в устойчивый источник CO<sub>2</sub> в атмосферу.

*Прямые измерения баланса C в зрелом ельнике Тверской области показали, что он также являлся источником CO<sub>2</sub> со средней величиной, равной 156 ± 93 г С/м<sup>2</sup>/год (Kurbatova et al., 2013).*

# **Выводы:**

- В глобальном стоке углерода самая значительная роль (~ 70%) принадлежит лесным экосистемам. На долю лесов России приходится 18% поглощения CO<sub>2</sub> всеми лесами мира.**
- Смешанные и лиственные леса южного Подмосковья в вегетационный сезон выступают стоком углерода со средней величиной, варьирующей от 41 до 112 г С/м<sup>2</sup> в зависимости от доли, приходящейся на корневое дыхание.**
- С учетом эмиссии CO<sub>2</sub> из почв в холодный период года лесные ценозы с высокой долей вероятности функционируют как источник углекислого газа в атмосферу, достигая иногда весьма значительных величин (160 – 300 г С/м<sup>2</sup>/год).**

**□ Изменчивость величины баланса углерода в лесных экосистемах южного Подмосковья на 40-50% объясняется степенью засушливости текущего летнего периода.**

**□ На стоковую функцию лесных экосистем влияют погодные условия предыдущего года исследований. Так, в смешанных старовозрастных лесах мы наблюдали снижение продукционной составляющей на следующий после засухи год, что косвенно может свидетельствовать об усилении стока в лесные экосистемы в засушливые годы.**

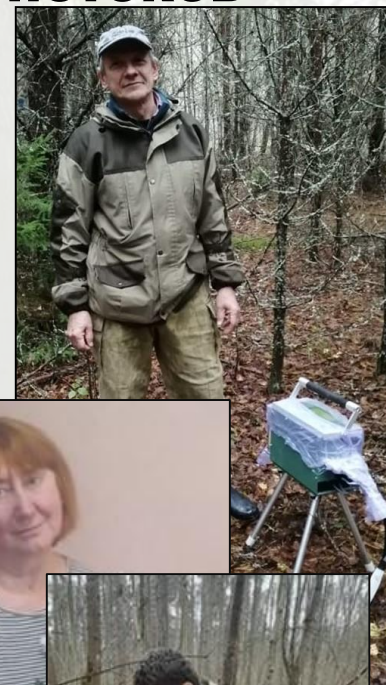
**□ Получение более обоснованных оценок роли лесов в качестве стока или источника CO<sub>2</sub> в атмосферу может и должно базироваться на применении современных прямых методов измерения (напр., eddy-covariance).**



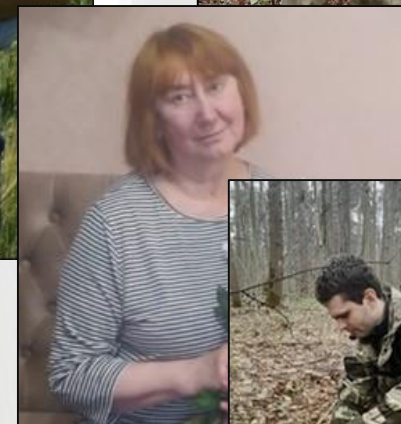
# **В исследовании принимали участие:**

**Сотрудники Лаборатории почвенных циклов азота и углерода ИФХиБПП РАН (Группа мониторинга потоков углерода):**

**внс., к.т.н. В.О. Лопес де Гереню**



**снс, к.б.н. Т.Н. Мякшина**



**снс, к.б.н. Д.В. Сапронов**



**мнс, к.б.н. Д.А. Хорошаев**



**мнс В.А. Жмурин**

# **Благодарности:**

**к.б.н. В.А. Аблеева - Станция фонового мониторинга,  
Приокско-террасный биосферный заповедник  
(метеоданные)**

**Академик РАН, д.г.н. И.Ю. Савин – Почвенный Институт  
им. В.В. Докучаева (данные NDVI)**

**к.г.н. С.С. Быховец - ИФХиБПП РАН (актинометрические  
данные)**

**В.В. Каганов – ЦЭПЛ РАН, данные учета валежа**

**Многолетняя финансовая поддержка:  
РФФИ и Программ Президиума РАН.**





**Спасибо за  
внимание!**



# Оценка NPP на основе вегетационного индекса NDVI

$$NPP = \varepsilon * \sum (NDVI * PAR)$$

## Параметры:

$\varepsilon$  (g C/MJ) - эффективность использования света растениями;

$\varepsilon = 0,283$  (Смешанный лес, Albeluvisols)

$\varepsilon = 0,302$  (Лиственный лес, Phaeozems)

*Source: Dorman and Sellers (1989)*

**NDVI** – вегетационный индекс (MODIS);

**PAR**  $\approx$  **0.5 IAR (MJ/m<sup>2</sup>);**

данные для Пущино за **2005-2014 гг**, район  
обсерватории (С. Быховец);