



ПУЛЫ И ПОТОКИ УГЛЕРОДА В НЕКОТОРЫХ ТИПАХ ХВОЙНО-ШИРОКОЛИСТВЕННЫХ И ШИРОКОЛИСТВЕННЫХ ЛЕСОВ: ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ И МОДЕЛЬНЫЕ ОЦЕНКИ

И.Н. Курганова, В.Н. Шанин и др.

**Институт физико-химических и биологических проблем
почвоведения РАН ФИЦ ПНЦБИ РАН**

Состав коллектива в 2023 г.

Группа пулов и потоков С

1	Курганова И.Н.	гнс, д.б.н., рук. проекта
2	Семенов В.М.	гнс, д.б.н.
3	Лопес де Гереню В.О.	внс, к.т.н.
4	Лебедева Т.Н.	снс, к.б.н.
5	Сапронов Д.В.	снс, к.б.н.
6	Зинякова Н.Б.	снс, к.б.н.
7	Ходжаева А.К.	снс, к.б.н.
8	Мякшина Т.Н.	снс, к.б.н.
9	Личко В.И.	снс, к.б.н.
10	Журавлева А.И.	нс, к.б.н.
11	Волкова Т.Ю.	и.о. мнс, аспирант
12	Семенова Н.А.	гл. спец
13	Митрохина Е.С.	вед. инж, магистрант

Группа моделирования

1	Шанин В.Н.	снс, к.б.н., рук. группы
2	Припутина И.В.	внс, к.г.н.
3	Быховец С.С.	внс, к.г.н.
4	Фролов П.В..	нс, к.б.н.
5	Зубкова Е.В.	снс, к.б.н.
6	Никонов А.В.	лаборант

**Активная помощь сотрудников
молодежной лаборатории,
особенно в полевых работах**

Основные задачи коллектива в 2023 г.

Научный блок:

(1) Оценка пулов и потоков С в различных экосистемах зоны хвойно-широколиственных и широколиственных лесов:

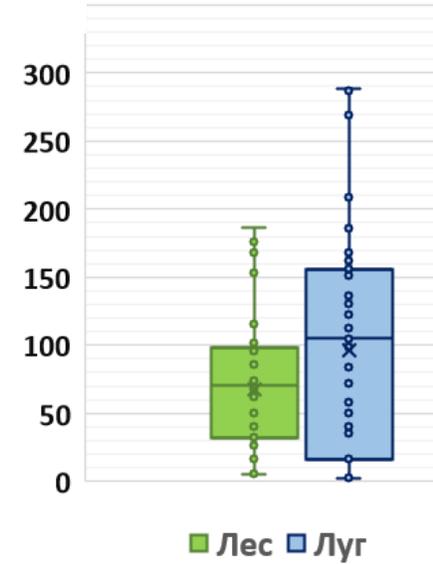
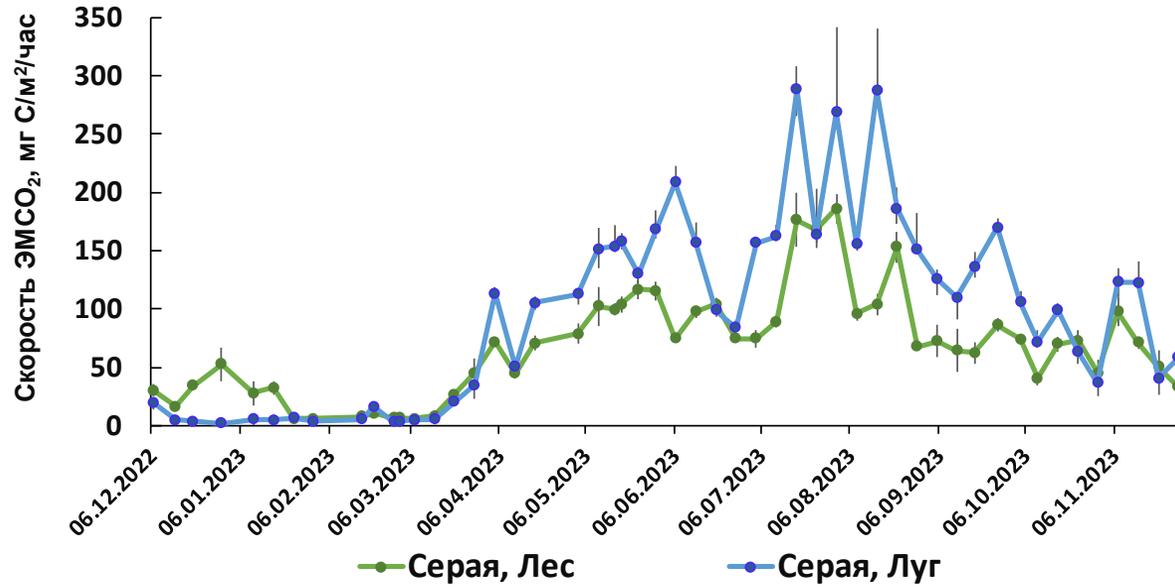
- *Анализ круглогодичной динамики эмиссии CO₂ (ЭМ_{CO₂}) из почв на 6 площадках наблюдений;*
- *Детальная характеристика почв и описание растительности на площадках мониторинга за ЭМ_{CO₂};*
- *Организация 2-х полигонов по типу БГЦ на ЭКС «Пущино» (лесозарастающий участок, 6 ППП) и на территории вторичного леса и проведение почвенно-ботанических исследований в соответствии с едиными методическими рекомендациями.*

(2) Прогноз динамики пулов углерода и потоков парниковых газов в лесных экосистемах на основе имитационного моделирования;

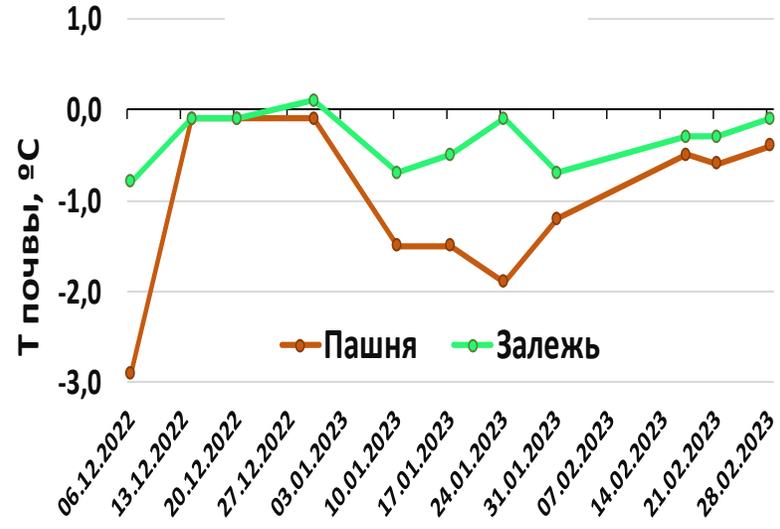
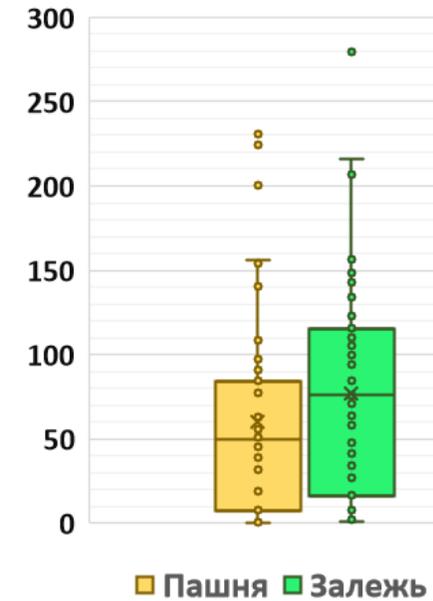
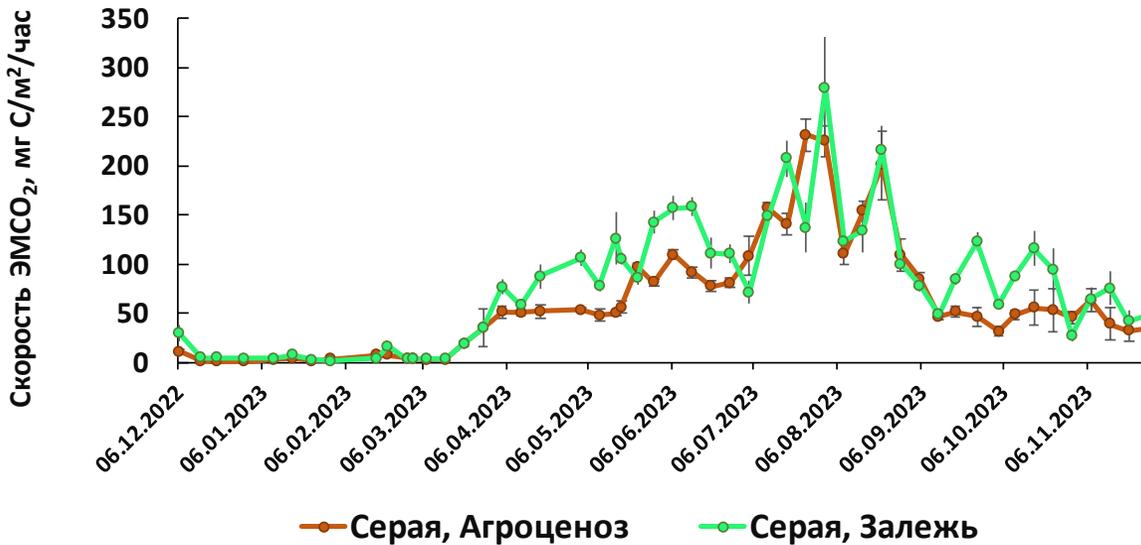
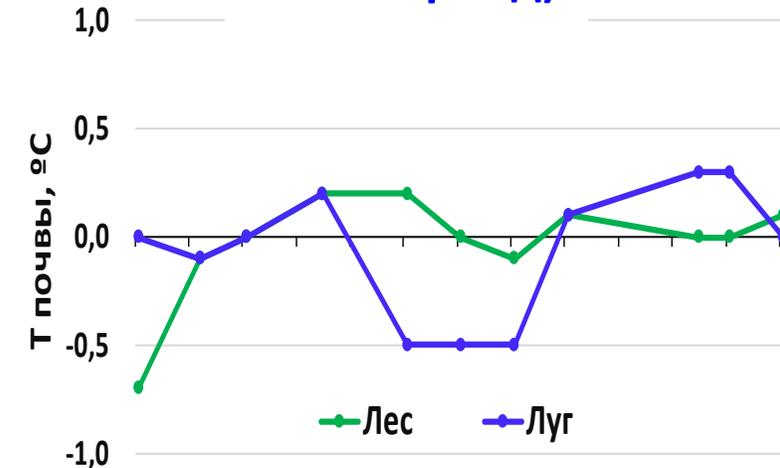
Технический блок:

Создание инфраструктуры и технического обеспечения для (а) автоматического круглогодичного мониторинга за экосистемными потоками ПГ на ЭКС «Пущино» с включением в сеть Rflux и (б) проведения лизиметрических наблюдений.

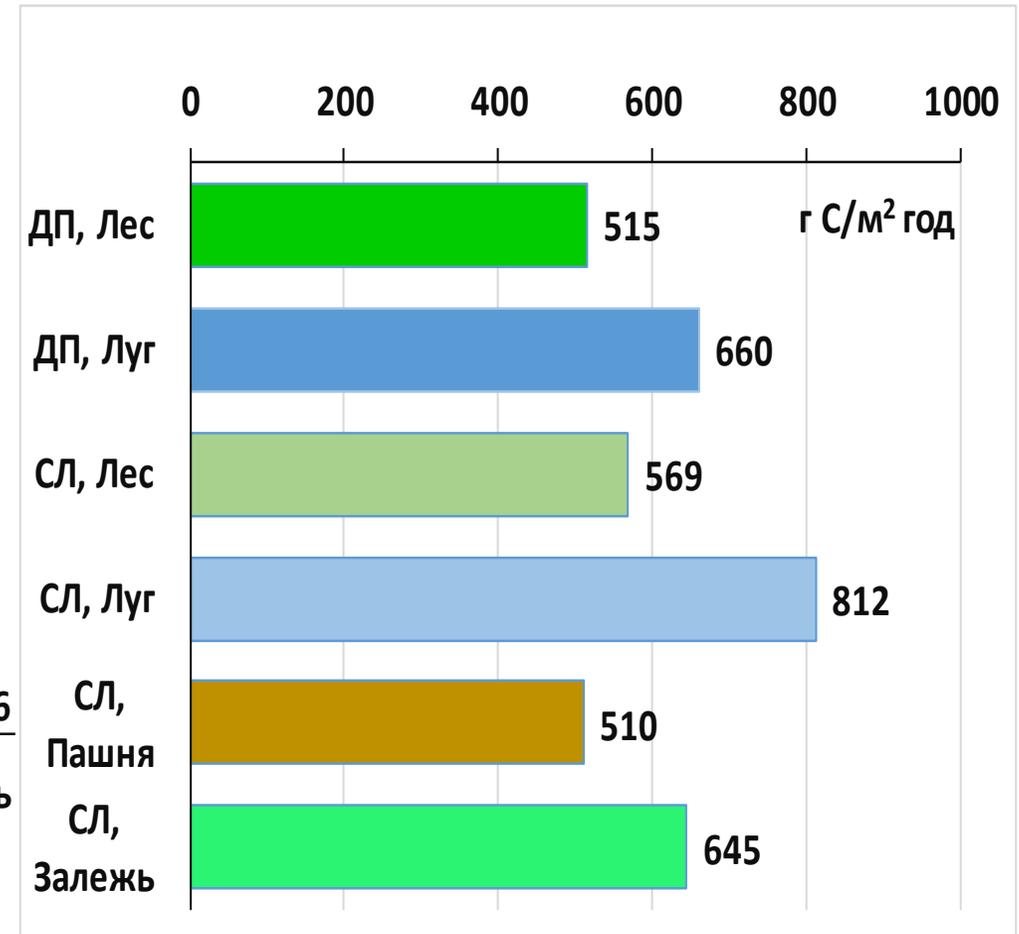
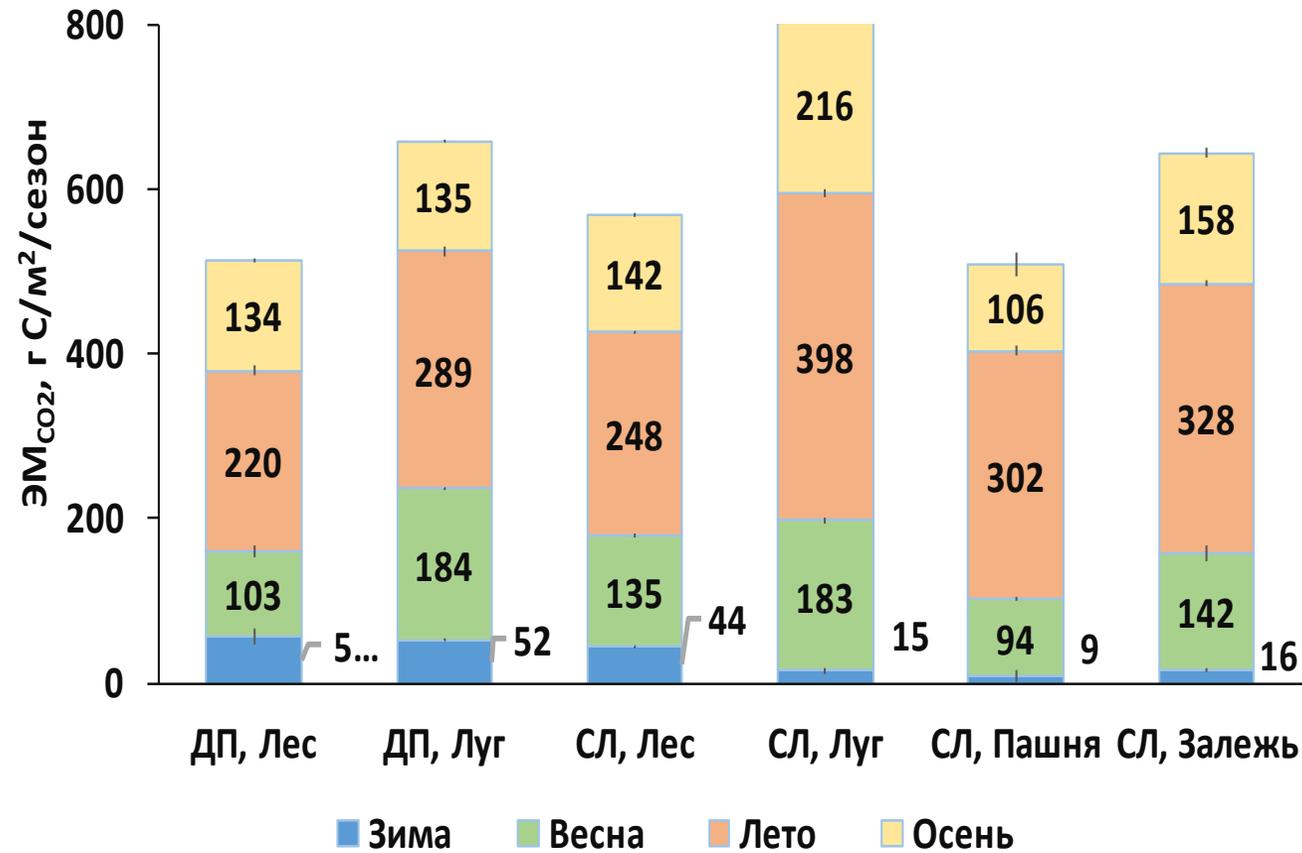
Мониторинг эмиссии CO₂ из серых почв (зона широколиственных лесов)



Динамика температуры почвы в зимний период



Мониторинг эмиссии CO₂ из почв на 6 площадках наблюдений: Величина и структура годовых потоков CO₂ их почв в 6 типах БГЦ



ДП – дерново-подбур; СП – Серая почва

Применение ансамбля нелинейных T&P моделей для оценки SR на примере 2-х лесных экосистем южного Подмосковья

Optimal model

Warm season ↑

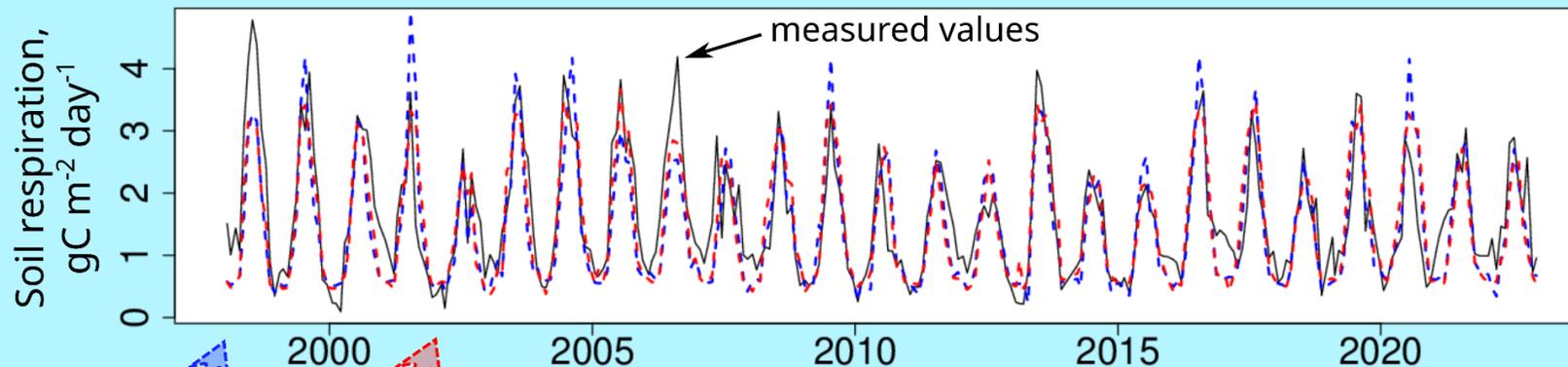
TPP
Raich-Hachimoto

Threshold

$T_{\text{soil}} = 2\text{ }^{\circ}\text{C}$

Cold season ↓

TPP_{carb}



TPP
Raich
Hachimoto

MBE 0.11
RMSE 0.53
R² 0.70

$$SR_{TPPrh} = R_0 e^{(QT - Q_2 T^2)} \left(\frac{\alpha P + (1 - \alpha) P_{m-1}}{K + \alpha P + (1 - \alpha) P_{m-1}} \right)$$

TPP_{carb}

MBE 0.16
RMSE 0.57
R² 0.70

$$SR_{TPPC} = R_0 e^{QT} \left(\frac{\alpha P + (1 - \alpha) P_{m-1}}{K + \alpha P + (1 - \alpha) P_{m-1}} \right) \left(\frac{SOC}{\psi + SOC} \right)$$

TPP

MBE 0.21
RMSE 0.58
R² 0.69

$$SR_{TPP} = R_0 e^{QT} \left(\frac{\alpha P + (1 - \alpha) P_{m-1}}{K + \alpha P + (1 - \alpha) P_{m-1}} \right)$$

TP

MBE 0.23
RMSE 0.59
R² 0.68

$$SR_{TP} = R_0 e^{QT} \left(\frac{P}{K + P} \right)$$

T

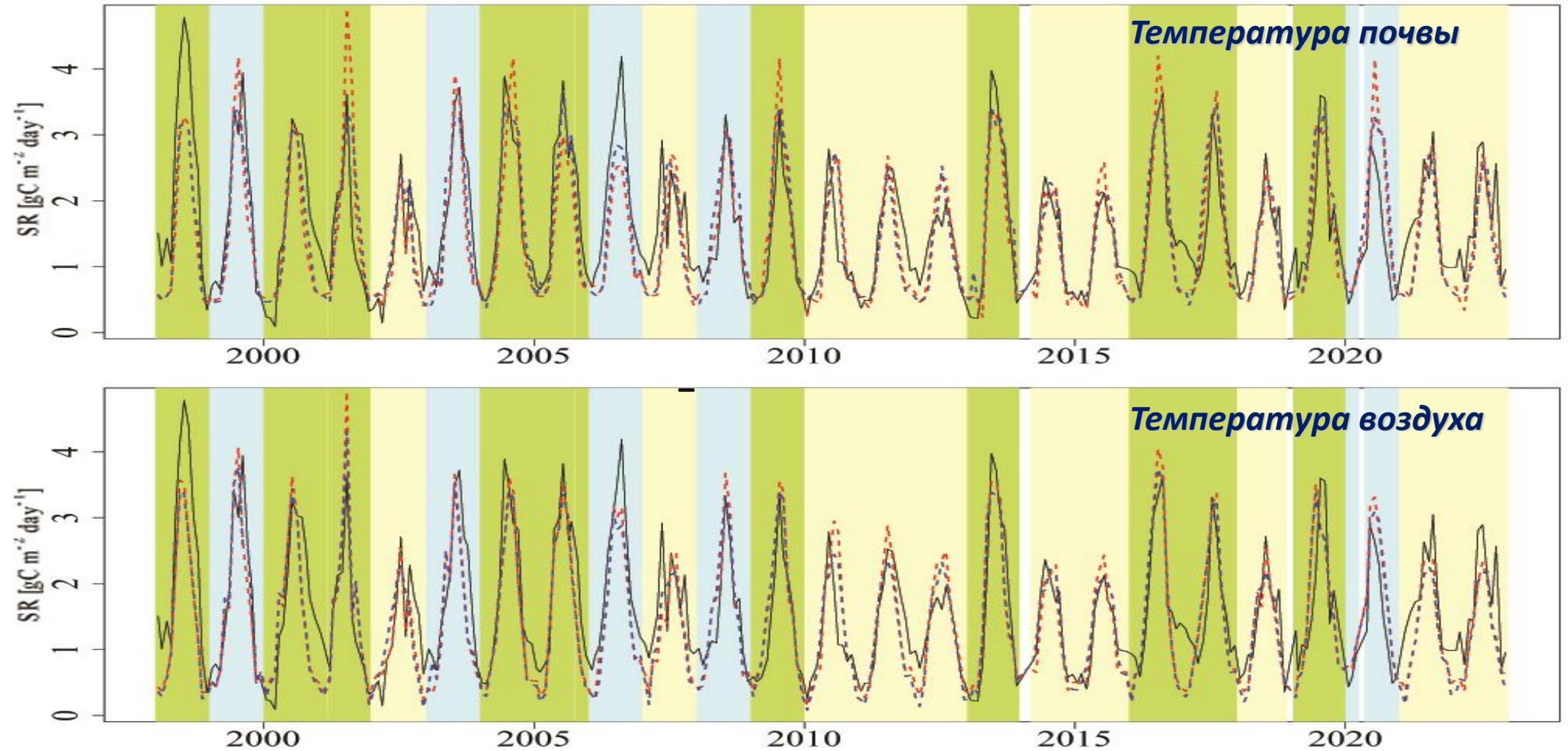
MBE 0.25
RMSE 0.60
R² 0.68

$$SR_T = R_0 e^{QT}$$

T - soil/air monthly temperature
P - monthly precipitation
SOC - soil organic carbon
MBE - mean bias error
RMSE - root mean square error

Работа выполнена совместно с сотрудниками молодежной лаборатории и опубликована Kivalov et al., Forests, 2023

Применение разных версий T&P моделей для оценки SR дерново-подбуря в разные по увлажненности годы

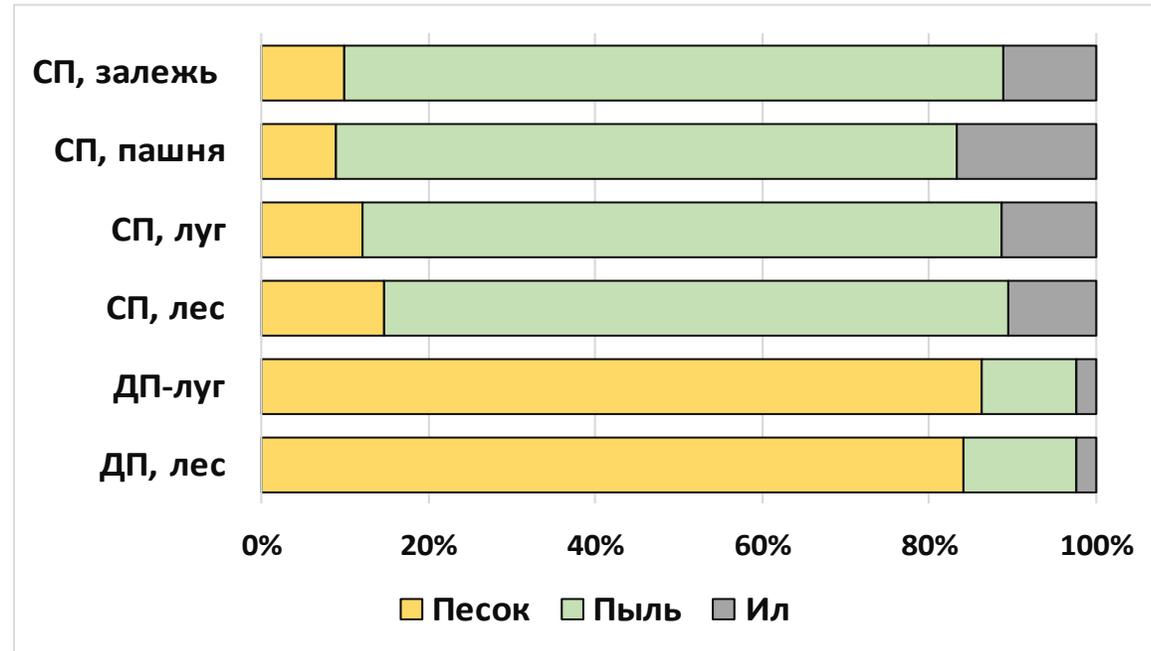


Черная линия – данные экспериментальных измерений SR; **красный пунктир** - TRRS модель; **голубой пунктир** - TRPrh модель; Уровень увлажнения: **зеленый цвет** – нормальные; **голубой** – влажные; **желтый** - сухие

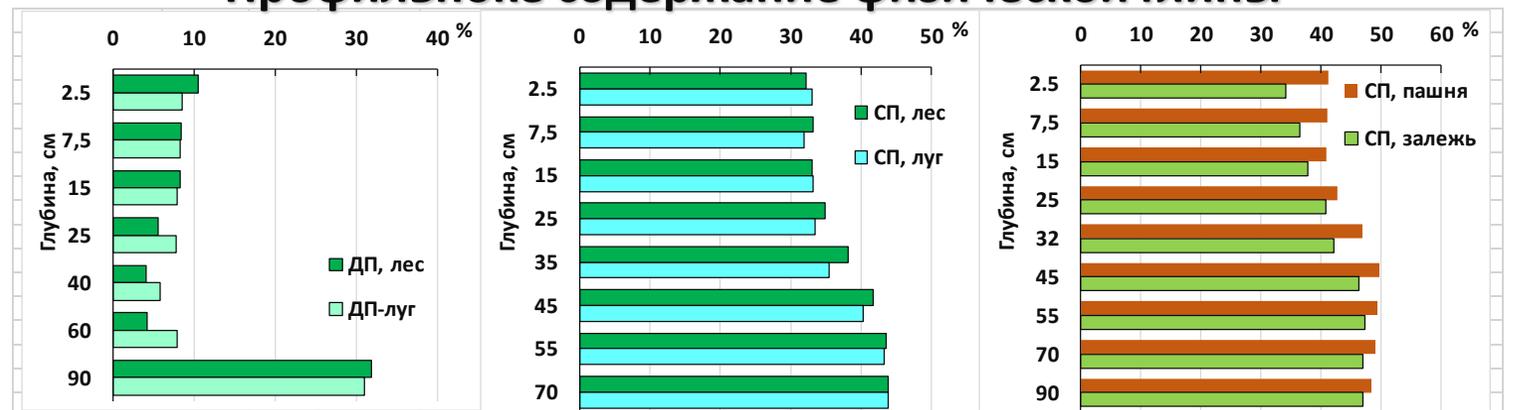
Анализ почв на мониторинговых площадках

- **Полнопрофильные разрезы (до 1.5 м) + 3-4 прикопки (0,6 м) и их морфологическое описание**;
- **Послойный отбор проб (0–5, 5–10, 10–20, 20–30, 30–50, 50–60, 60–80, 80–100 см)**;
- **Определено:**
Гранулометрический. состав,
Плотность;
Наименьшая влагоемкость;
Величина pH(KCl),
Содержание и запасы Сорг, Нобщ;
Отношение C/N;
Скорость базального дыхания и
сод-е С микробной биомассы,
Масса и величина pH подстилки в
лесных БГЦ;
- **Для слоя 0-10 см выполнено:**
Гранулометрическое и термическое фракционирование ОВ;
Для слоя 0-5 см - активность гидролитических ферментов.

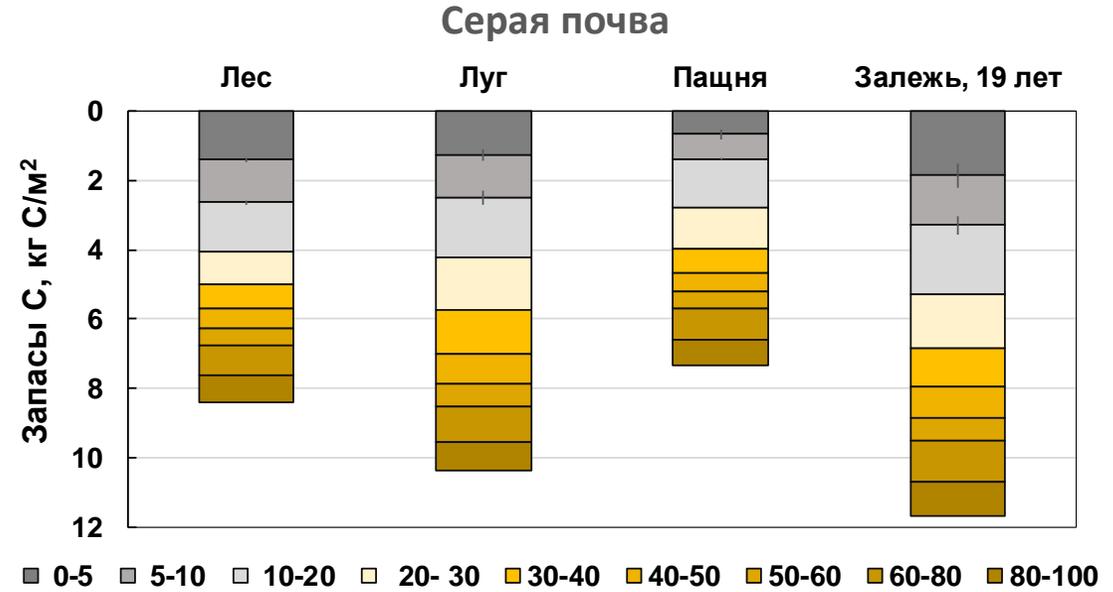
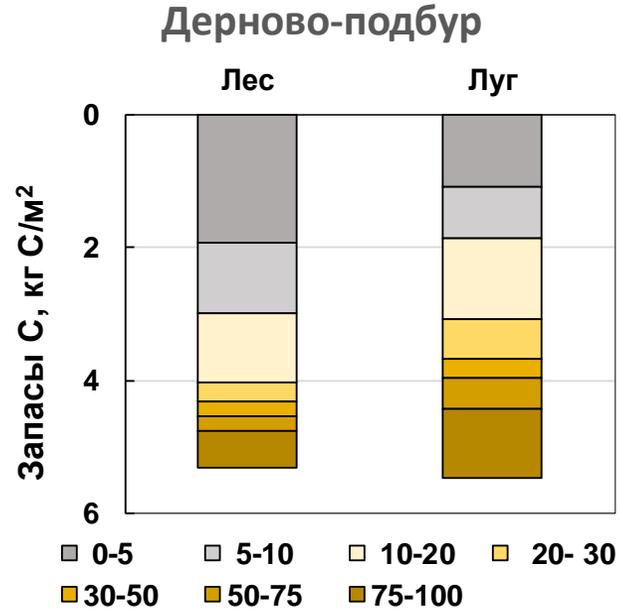
Гранулометрический состав почв (слой 0-10 см): ДП – дерново-подбур; СП – Серая почва



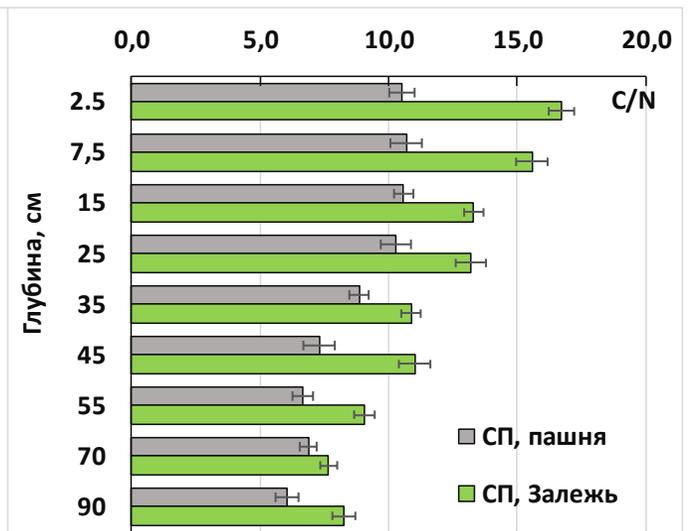
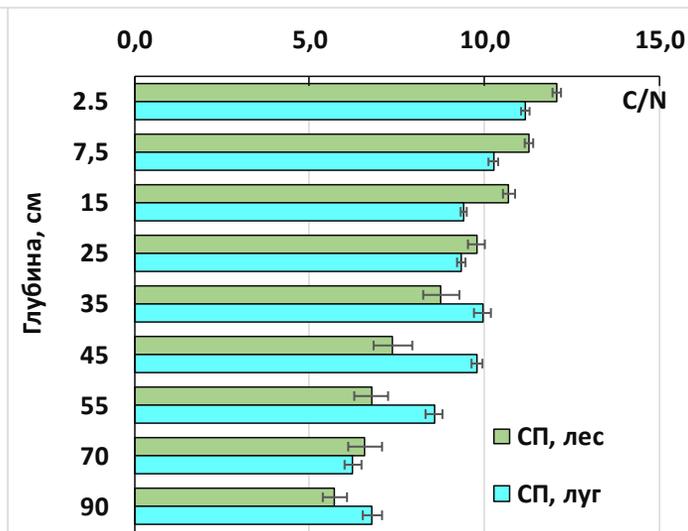
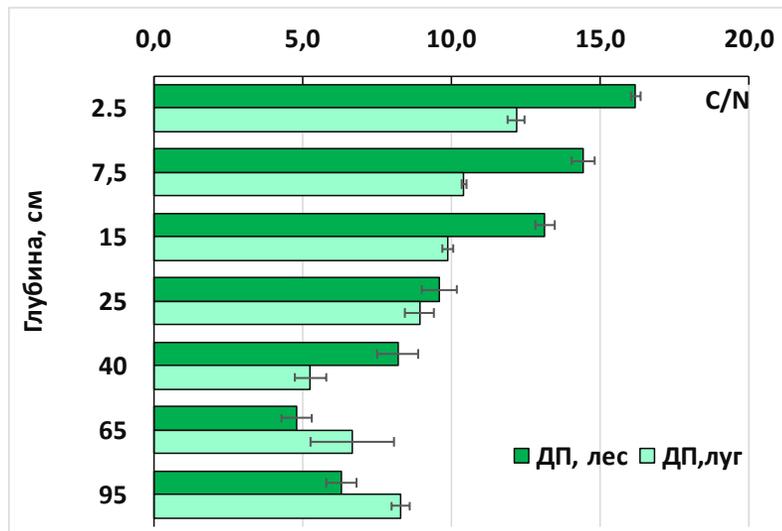
Профильное содержание физической глины



Запасы углерода в почвах на мониторинговых площадках

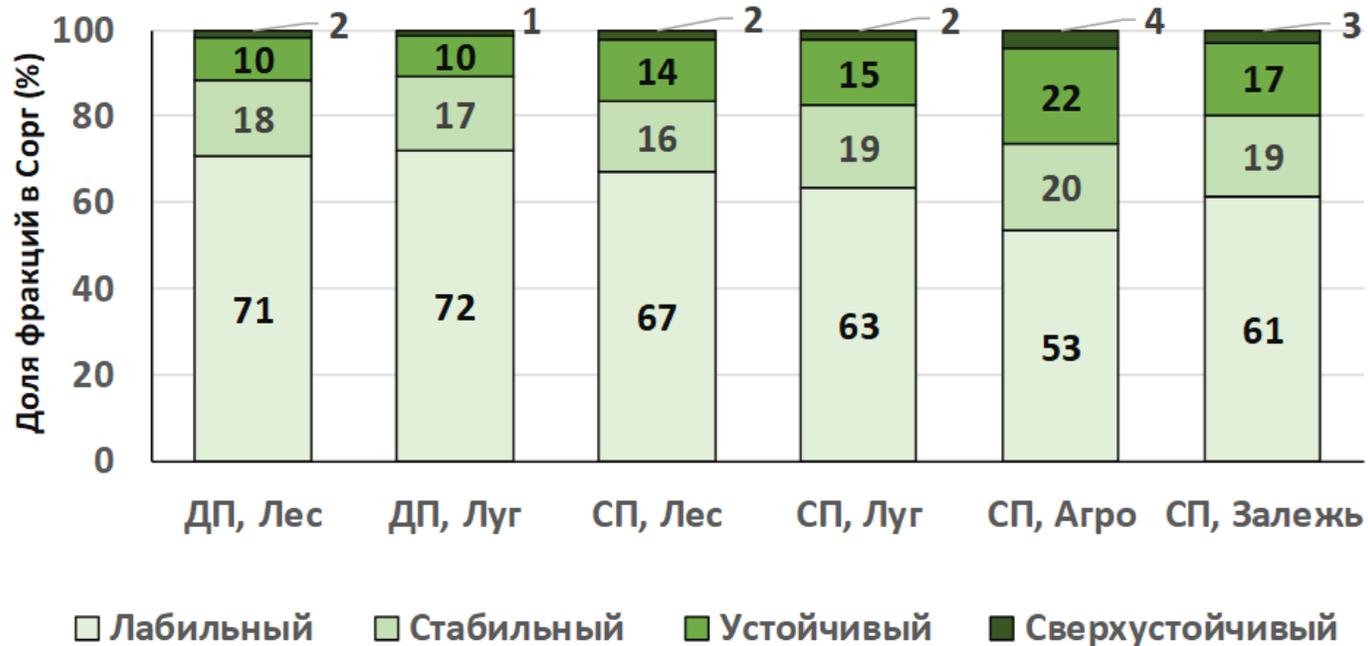


Соотношение С/Н в почвах на мониторинговых площадках



Соотношение различных фракций в составе ОВ на мониторинговых площадках (ДП – дерново-подбур, СП – серая почва; слой 0-10 см)

Результаты термического фракционирования ОВ



Результаты гравиметрического фракционирования ОВ

Объект	Масса РОМ*, %	% от Сорг	
		C-РОМ	C-МАОМ
ДП, Лес	92,1	46,2	26,6
ДП, Луг	92,9	42,1	15,8
СП, лес	21,0	54,6	63,6
СП, Луг	17,3	46,2	67,0
СП, Пашня	6,2	25,3	88,8
СП, Залежь	9,6	29,9	43,8

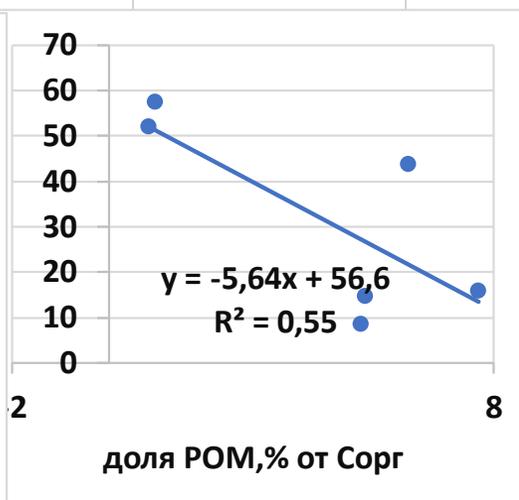
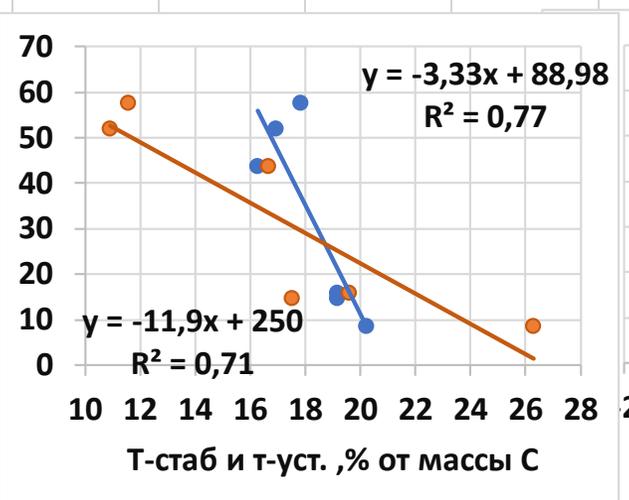
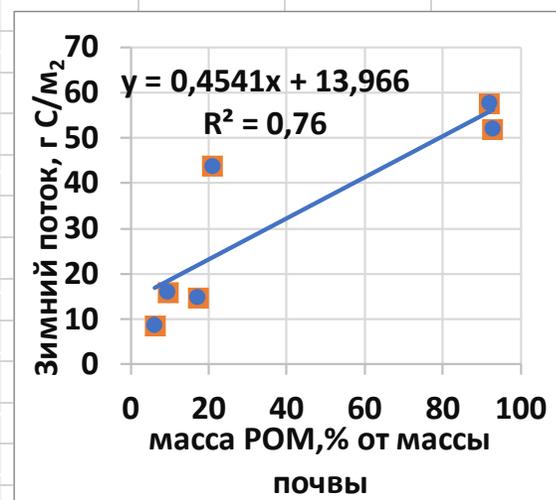
Микробная и ферментативная активность почв на мониторинговых площадках(0- 10см)

Объект	Скорость БД, мкг С/г п./час	Смик, мкг С/г п.	Активность ферментов, мкмоль МУФ*г-1*ч-1				
			Бета-глю- козидаза	Хити- наза	Ксила- наза	Фосфа- таза	Общий пул
ДП-Лес	0,99±0,39	150±35	449	673	81	2280	3482
ДП-Луг	1,50±0,12	211±11	535	477	113	2666	3791
СП-Лес	1,31±0,02	461±59	3886	1091	430	3542	8949
СП-Луг	1,13±0,12	396±34	1929	970	370	2802	6071
СП-Агро	0,72±0,14	371±37	748	193	121	1264	2326
СП-Залежь	1,11±0,07	401±33	1432	517	297	2193	4438

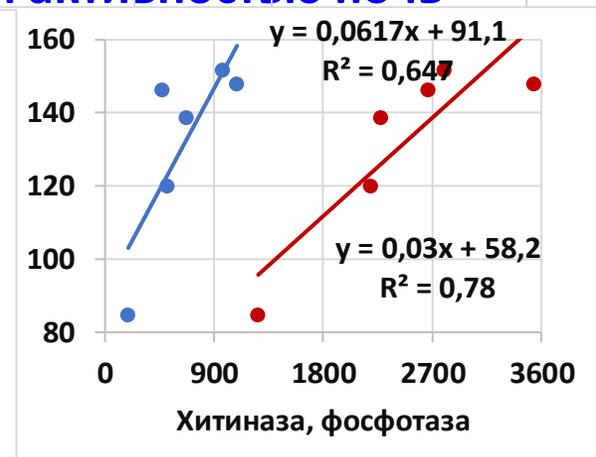
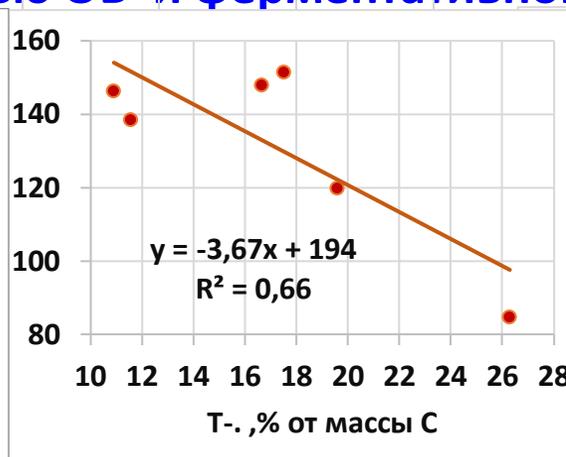
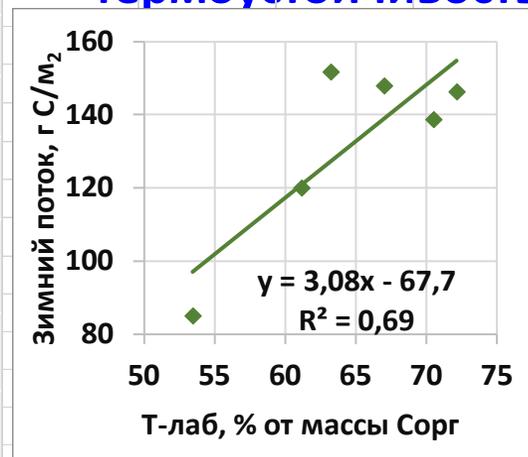
Корреляция между эмиссией CO₂ из почв в разные сезоны года с почвенными характеристиками

	Поток CO ₂ , зима
Масса POM от массы почвы	0,87
C-МАОМ (% от массы фракции)	0,87
Термолабильный	0,91
Термосабильный	-0,85
Термоустойчивый	-0,88
	Поток CO ₂ , хол. период
Содержание N	0,96
C-РОМ, % от Сорг	0,88
Термолабильный	0,83
Термоустойчивый	-0,81
Активность хитиназы	0,80
Активность фосфатазы	0,88

Корреляция между величиной зимних потоков и качеством ОВ почв



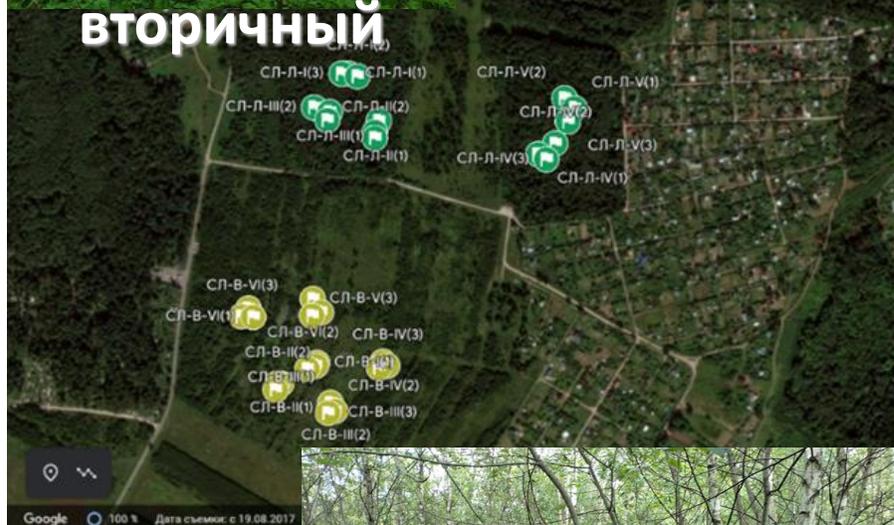
Корреляция между величиной холодных потоков, термоустойчивостью ОВ и ферментативной активностью почв



Организация 2-х полигонов по типу БГЦ



**БГЦ1_ Лес
вторичный**

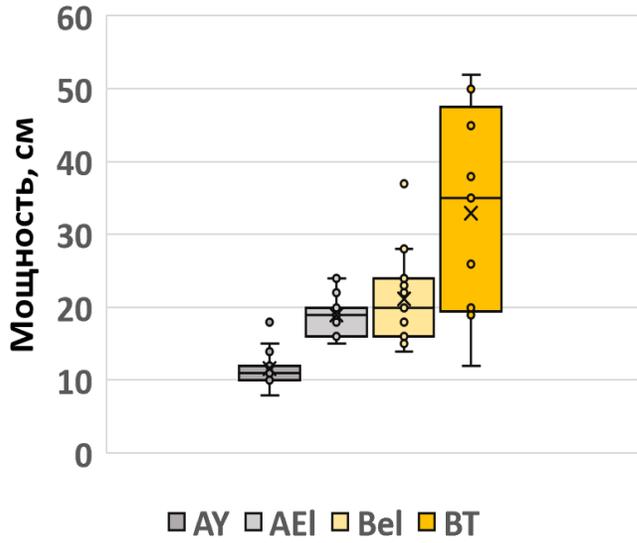


БГЦ2_ ЭКС «Пушино»

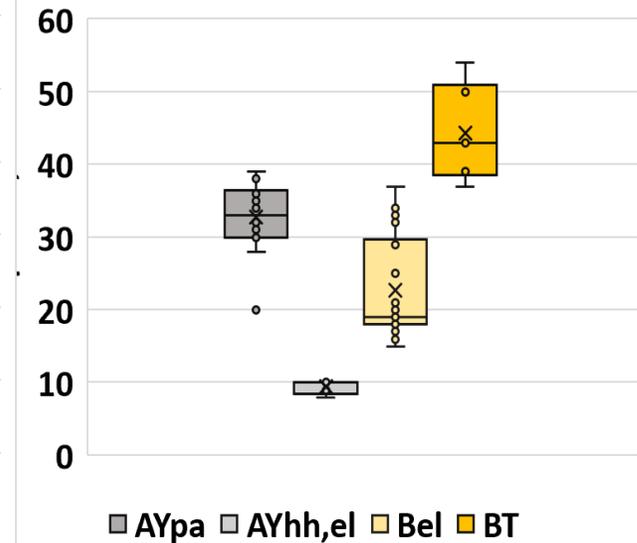
ВИД ИССЛЕДОВАНИЙ	БГЦ 1	БГЦ 2
Пробные площади (ПП)	5	6
Разрезы / прикопки	5 / 10	6 / 12
Отбор почвенных образцов для определения плотности минеральных горизонтов	66	78
Определение в почвенных образцах доли мелкозема, гигроскопической влаги и величины рНводн, содержание С, N	66	78
Отбор образцов почвообразующей породы, определение валового состава и текстуры	5	6
Отбор почвенных образцов на определение БД, СИД и содержания Смик	30	39
Отбор наземной биомассы и определение сухой массы по доминантам (выполнено), определение содержания С и N	15	18
Отбор подстилки (опада), определение содержания С и N	15	18
Отбор подземной биомассы, определение содержания С и N	15	18
Отбор фотосинтезирующих органов древесных растений	10	12
Отбор почвенно-зоологических проб – выполнено	15	18
Геоботаническое описание – выполнено	5	6
Таксация – запланирована на весну 2024 г.)	5	6

Вариабельность некоторых почвенных характеристик в пределах генетических горизонтов

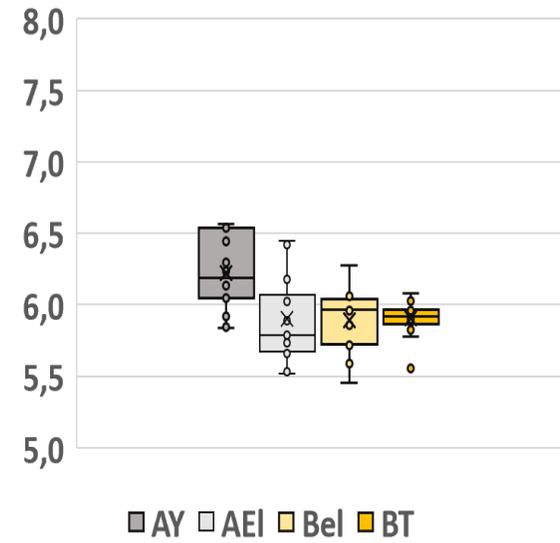
Мощность горизонтов (БГЦ "Лес")



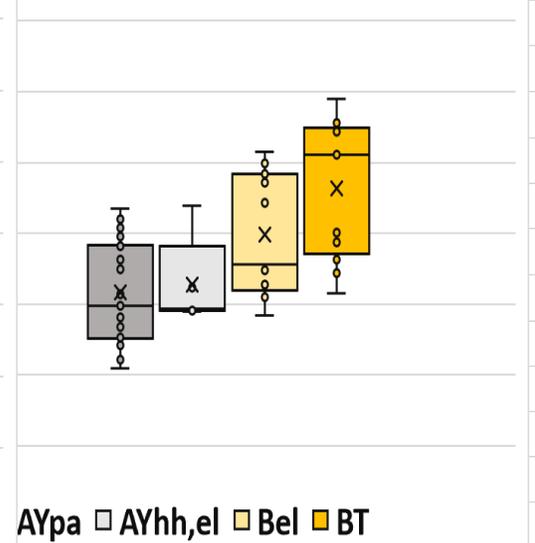
Мощность горизонтов (ЭКС "Пушино")



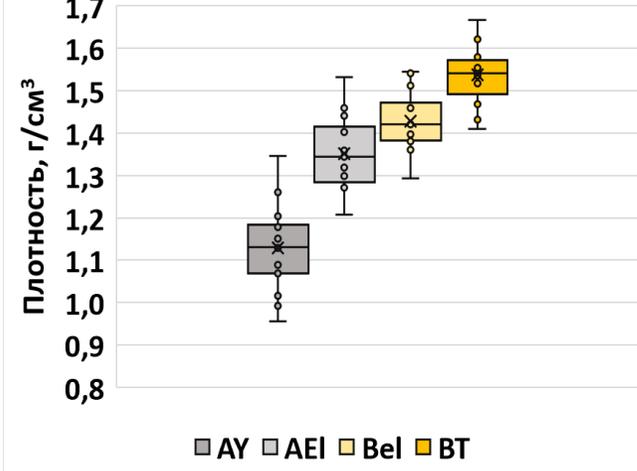
pH (БГЦ "Лес")



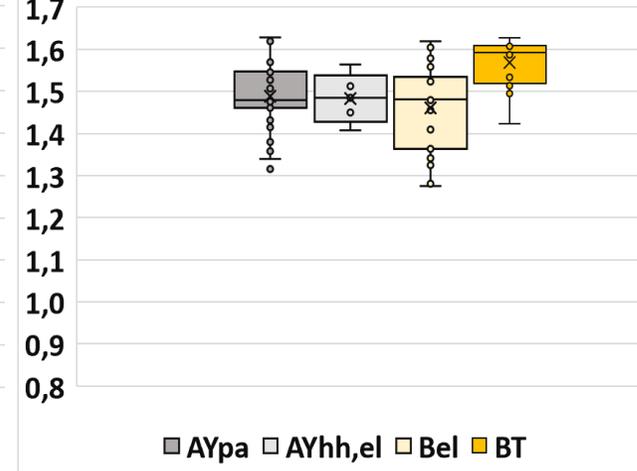
pH (ЭКС "Пушино")



Плотность (БГЦ "Лес")



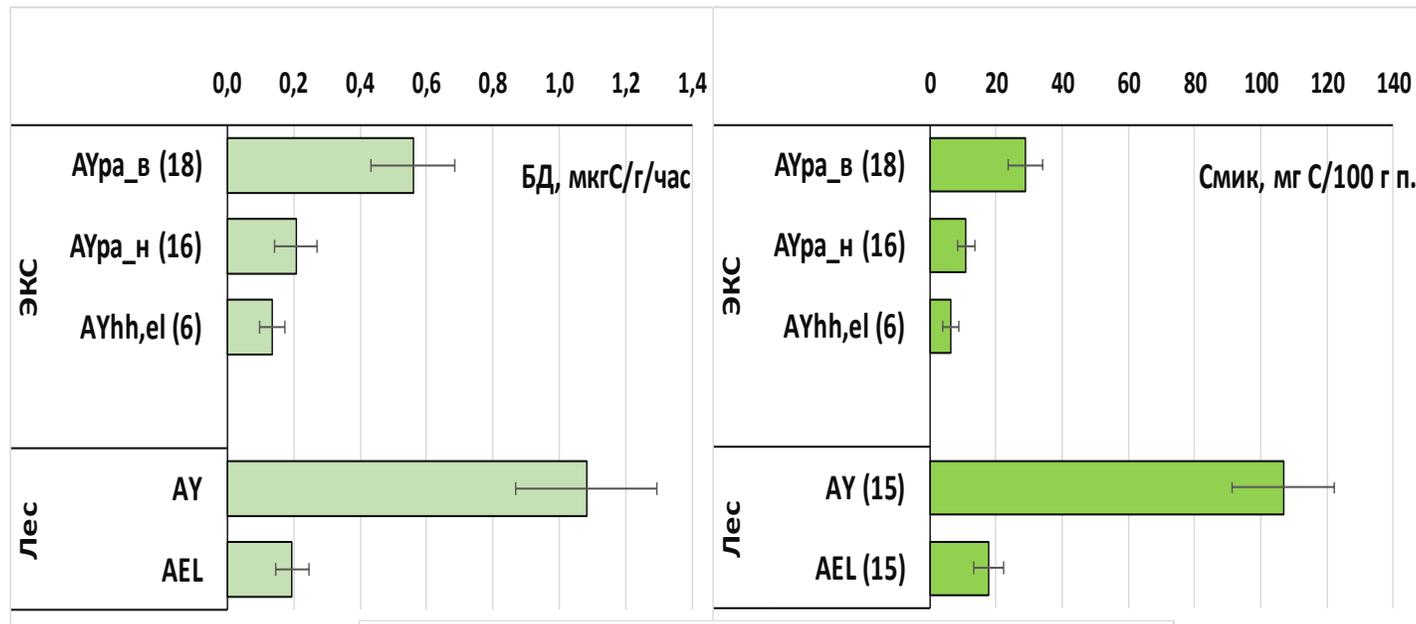
Плотность (ЭКС "Пушино")



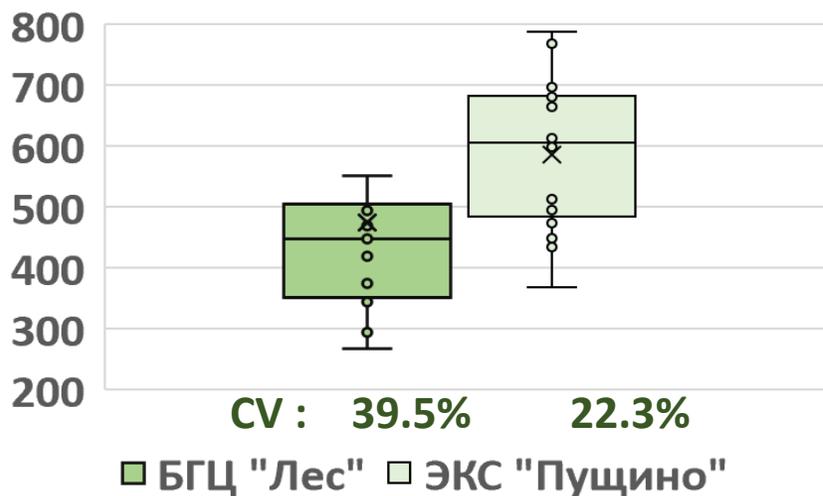
Коэффициенты вариации, %

	БГЦ "Лес"			ЭКС "Пушино"			
	Мощн ость	Плотнос ть	pH	Мощнос ть	Плотн ость	pH	
AY	21,2	9,1	5,8	AYpa	14,0	4,9	4,1
AEI	15,1	6,3	5,2	AYhh,el	9,5	4,0	4,9
Bel	29,4	4,7	6,3	Bel	30,9	7,2	3,9
BT	43,9	4,0	7,0	BT	14,7	3,7	1,6

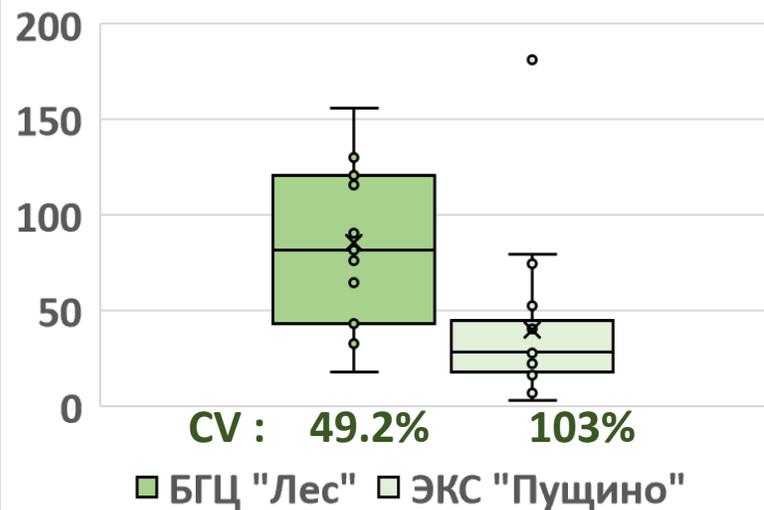
Микробные характеристики, масса подстилки и биомасса червей в почвах 2-х БГЦ



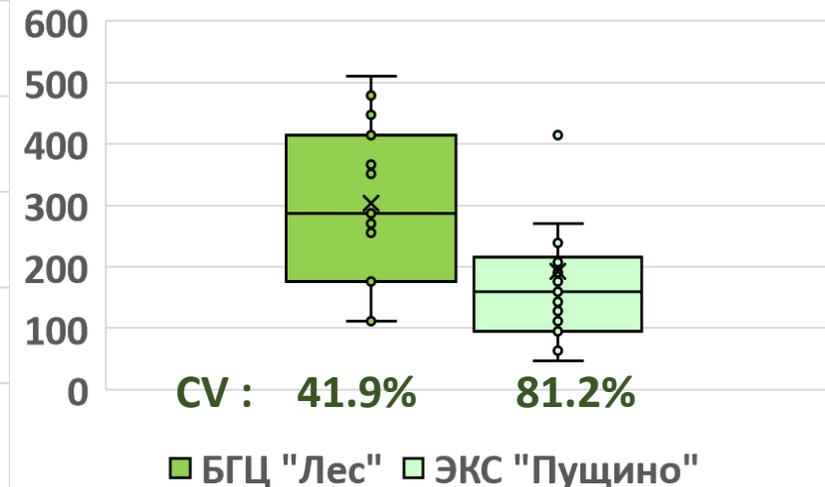
Запас подстилки, г/м²



Биомасса дождевых червей, г/м²



Численность дождевых червей, экз/м²



Задача: Прогноз динамики пулов углерода в лесных экосистемах на основе имитационного моделирования

Объекты исследования:

- **Заповедник «Брянский лес»:** подзона широколиственных лесов; преобладают средневозрастные древостои; состав: 56% – берёза, осина и другие мелколиственные, 35% – сосна, 3% – ель, 6% – широколиственные. Преобладают ТЛУ В3, С3, В2, С5, С4. Почвы дерново-подзолистые, песчаные. 112.7 км².
- **Данковское лесничество (Московская область):** подзона хвойно-широколиственных лесов; преобладают средневозрастные древостои; состав: 61% – берёза, осина и другие мелколиственные, 21% – сосна, 13% – ель, 5% – широколиственные. Преобладают ТЛУ С3, С2, В2. Слабоподзолистые почвы на песках. 68.4 км².
- **Участки Воскресенского лесничества (Нижегородская область):** подзона южной тайги; преобладают средневозрастные древостои; состав: 39% – берёза, осина и другие мелколиственные, 53% – сосна, 5% – ель, 3% – широколиственные. Преобладают ТЛУ В2, В3, С2. Дерново-подзолистые супесчаные почвы. 81.7 км².
- **Участки Прионежского и Пряжинского лесничеств (Республика Карелия):** подзона средней тайги; преобладают средневозрастные древостои; состав: 54% – берёза, осина и другие мелколиственные, 22% – сосна, 24% – ель. Преобладают ТЛУ В3, С3, В4, А3. Подзолистые и дерново-подзолистые почвы. 168.3 км².

Имитационные сценарии

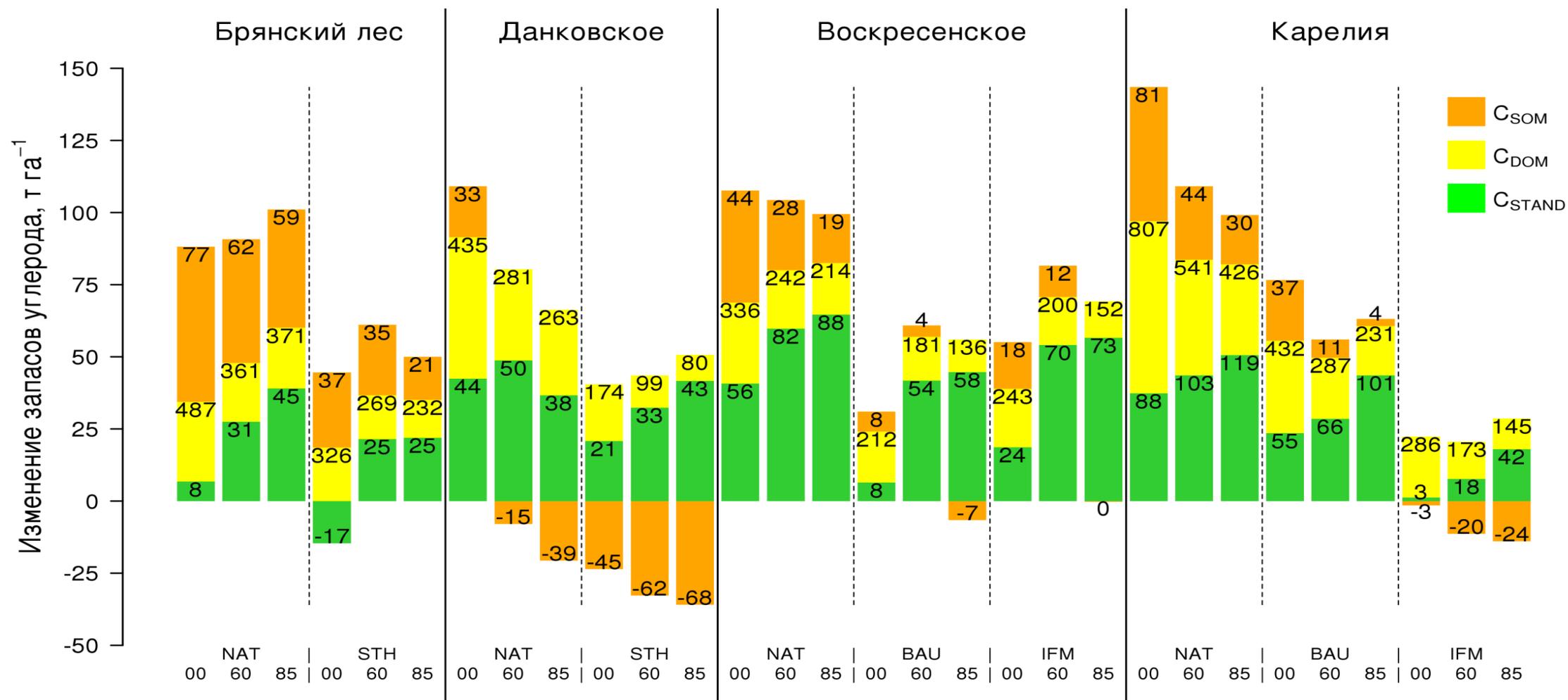
Заповедание (NAT): Отсутствие любой хозяйственной деятельности. *[Брянский лес, Данковское, Воскресенское, Карелия]*

Выборочные рубки (STH): Добровольно-выборочная рубка в 2 приёма, полный цикл рубок ухода. Естественное заращивание. Во всех сценариях – ориентация на выращивание хвойных, порубочные остатки убираются с лесосеки. *[Брянский лес, Данковское]*

Текущая ситуация (BAU): Сплошные рубки в эксплуатационных лесах, добровольно-выборочная рубка в 2 приёма – в защитных. Освоение расчётной лесосеки (65–87%) и выполнение рубок ухода (55–79%) – на основе статистических данных. Комбинирование искусственного лесовосстановления и естественного заращивания. *[Воскресенское, Карелия]*

Биоэкономика (BIO): Сплошные рубки в эксплуатационных лесах, добровольно-выборочная рубка в 2 приёма – в защитных. Освоение расчётной лесосеки (90–100%) и выполнение рубок ухода (70–100%), в зависимости от доступности выделов. Искусственное лесовосстановление в эксплуатационных лесах, естественное заращивание – в защитных. *[Воскресенское, Карелия]*

Результаты моделирования: Изменение основных пулов углерода за 100 лет при разных сценариях (т га⁻¹).



C_{SOM} – углерод органического вещества почвы, C_{DOM} – углерод мортмассы (подстилка, сухостой и валёж), C_{STAND} – углерод фитомассы древостоя.

*Цифры на столбцах отображают относительное изменение (%) за 100 лет.

Выводы (научный блок)

- Динамика эмиссии CO_2 в холодный период года и структура годовых потоков на серых почвах в 2023 г. зависела от промерзания почв;
- Применение ансамбля нелинейных T&P моделей показало, что точность результатов моделирования зависит от типа применяемой модели, уровня увлажнения и внутренних характеристик почвы (запасов Сорг и их водоудерживающей способности).
- Проведенный комплексный анализ почв на площадках мониторинга за эмиссией CO_2 из почв показал что типовая принадлежность почв (лерново-подбур vs серая почва) определила их контрастную текстуру (песок связанный vs суглинок средний), что в свою очередь стало детерминирующим фактором качественных особенностей ОВ почв. Фактор землепользования наиболее отчетливо проявил свое влияние среди серых почв, отражаясь в разной степени практически на всех анализируемых показателях.
- Выявлена значимая корреляция холодных и зимних потоков CO_2 из почв с качественным составом ОВ почв в слое 0-10 см, а холодных потоков с содержанием азота, активностью хитиназы и фосфатазы в слое 0-5 см.
- Показано соответствие расчётных и измеренных величин почвенных потоков CO_2 . Для четырёх ключевых лесных участков выполнены прогнозные оценки нетто-поглощения углерода при разных управленческих и климатических сценариях. Для ключевых участков показано, что сценарий без нарушений ведёт к нетто-поглощению углерода, прежде всего, за счёт накопления в древостое и в почвах. Вклад древостоев в экосистемный сток возрастает в сценариях с изменением климата, что объясняется ростом продуктивности насаждений. В то же время, при изменении климата наблюдается пониженное накопление углерода в почвах (или даже его потеря относительно начальных запасов) в силу ускорения процессов минерализации органического вещества.

**Другая деятельность
(технический блок)**

Создана инфраструктура на ЭКС «Пущино» для обеспечения многолетнего мониторинга ПГ

- На лесозарастающих землях (Пущино, Московская обл.) установлена вышка (34 метра) для проведения наблюдений за экосистемными потоками ПГ методом пульсационных измерений;
- Выполнено ограждение, установлены модульные блоки для размещения оборудования;
- Закуплен комплекс газометрического и метеорологического оборудования;
- ЭКС «Пущино» включена в каталог Ruffix

РИТМ
углерода

КАТАЛОГ ЭКОЛОГО-КЛИМАТИЧЕСКИХ СТАНЦИЙ



54° 49' 52.41" С.Ш. Абс. выс.
37° 34' 22.71" В.Д. 185 м

Зона широколиственных лесов



Московская область Город Пущино	Пущино MO_Push
Экосистема Березняк с примесью сосны и ивы (лесозарастающий участок бывшей пашни) Высота древостоя: 15-20 м, возраст древостоя: 20 лет	
Климат (1991-2020) Температура января: -7.2 °С Температура июля: 18.8 °С Среднегодовое количество осадков: 340 мм	
Измерения Период работы: 2023/24 г. Высота вышки: 35 м Мониторинг: потоки CO ₂ , метеорологические параметры (круглогодично)	
Основные публикации	
Организация Институт физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН ФИЦ ПНЦБИ РАН Контакты: Кивалов Сергей Николаевич snk2105@gmail.com Лопес де Гереню Валентин Овидиович vlopes@mail.ru Хорошаев Дмитрий Александрович d.khoroshaev@gmail.com	



Проведено оснащение и обучение сотрудников группы карбомониторинга приборами для автоматического определения содержания С и N в твердой и жидкой фазах



Анализатор азота и углерода в жидкостях N/C 2100S (Jena analytic, Германия)



Элементный CN анализатор EA 8024 (NC Technologies, Италия)

Установлены лизиметры и осадкосборники в лесном БГЦ ПТБЗ



На открытом (поляна) и лесном участках Приокско-Тerrasного биосферного заповедника (ПТБЗ) в 4-том квартале 2023 года были установлены осадкосборники и лизиметры на глубинах 0–10 см и 0–20 см. На площадке открытого участка размером 15×30 м установлено 4 осадкосборника и 14 лизиметров, на площадке лесного участка, размером 50×50 м установлено 12 осадкосборников и 30 лизиметров.

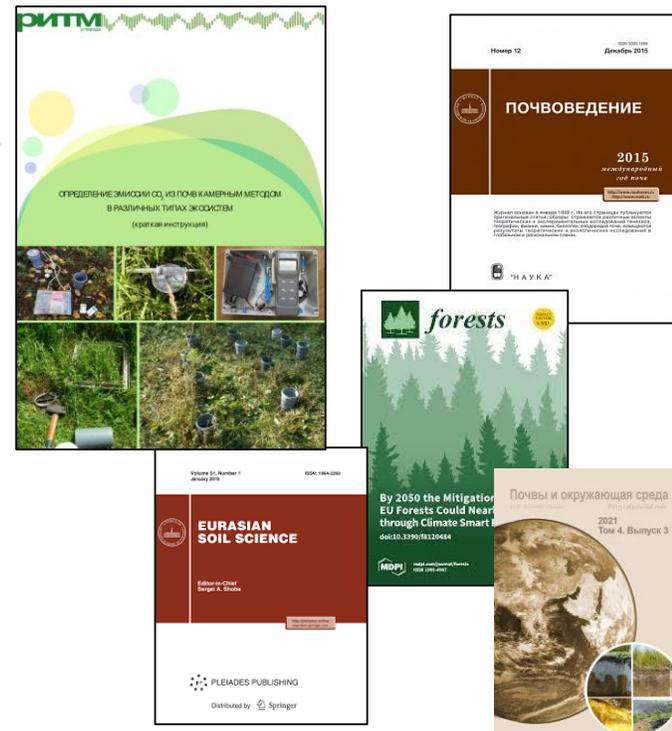
Публикационная деятельность, участие в конференциях

Свидетельства о государственной регистрации БД и программ для ЭВМ

1. **Курганова И.Н., Лопес де Гереню В.О., Мякшина Т.Н., Сапронов Д.В.** Свидетельство о государственной регистрации базы данных «Эмиссия CO₂ из почв Приокско-Террасного биосферного заповедника: 25 лет непрерывного мониторинга» (росреестр, № 2023622414).
2. **Быховец С.С., Фролов П.В.** SCLISS3 – Soil Climate Spatial Simulator
3. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023682059 от 20.10.2023.



Электронное издание ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭМИССИИ CO₂ ИЗ ПОЧВ КАМЕРНЫМ МЕТОДОМ В РАЗЛИЧНЫХ ТИПАХ ЭКОСИСТЕМ (краткая инструкция) // Курганова И.Н., Гончарова О.Ю., Замолодчиков Д.Г., Карелин Д.В., Лопес де Гереню В.О., Мошкина Е.В., Осипов А.Ф., Хорошаев Д.А., Пущино, 2023 г.



Статьи в рецензируемых изданиях – 9

Выступления на конференциях/симпозиумах с публикацией материалов – 13

Выступления на конференциях/симпозиумах без публикации материалов – 13

Основные задачи коллектива в 2024 г.

- Проведение интенсивного круглогодичного мониторинга эмиссии CO₂ из почв 6 репрезентативных экосистем в зоне хвойно-широколиственных и зоне широколиственных лесов и анализ полученных данных в связи с изменением гидротермических показателей.
- Определение таксационных показателей, основных пулов углерода в хвойно-широколиственных и широколиственных лесах 3 типов в южной части Московской области согласно единым методикам, разработанным экспертными группами консорциума.
- Оценка бюджета углерода в лесных БГЦ южного Подмосковья и на ЭКС «Пушино»;
- Оценка запасов органического углерода (SOC), углерода карбонатов (SIC), общего азота и актуальной кислотности в степных почвах при повторном анализе образцов из 70 почвенных профилей, отобранных в 2018-2021 гг. по трансектам, покрывающим всю степную зону Европейской части России.
- Прогнозная оценка динамики пулов и потоков углерода в лесных почвах РФ на национальном уровне при разных управленческих и климатических сценариях на основе интеграции модели динамики органического вещества почвы Romu1_Hum с глобальной лесной моделью G4M.
- Интеграция данных, полученных в рамках ВИП ГЗ, в ИАС «Углерод -Э».

А также:

- Дооснащение ЭКС «Пущинго» газометрическим и другим оборудованием для проведения исследований методом вихревых пульсаций и камерным методом
- Формирование и регистрация 7 БД баз данных (2 – по эмиссии CO₂ из почв репрезентативных экосистем южного Подмосковья , 4 – по свойствам почв и растительности в регионе южного Подмосковья, 1 – по запасам SOC и SIC в почвах степей);
- Подготовка статей, участие в конференциях;
- Поддержание сайта проекта <https://carbomonitoring.ru/>
- Создание видеоуроков по работе с оборудованием и измерению потоков CO₂ из почв, проведение обучающих семинаров (по запросу);
- Продвижение научных и социально-значимых результатов проекта в печати, на российских и международных площадках и в других видах распространения информации;
- Организация и участие в образовательных проектах.

Благодарю всех за внимание!



**А команду ВИП ГЗ и коллег из молодежной
лаборатории за самоотверженный труд и поддержку**