

Первая национальная сеть наблюдений за эмиссией CO₂ из почв России

Курганова И.Н., Ильясов Д.В., Хорошаев Д.А.,
Лопес де Гереню В.О., Д.В. Карелин

Институт физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН,
Пушино

Югорский Государственный Университет, Ханты-Мансийск

Институт географии РАН, Москва



Данные измерений эмиссии CO₂ из почв были предоставлены:

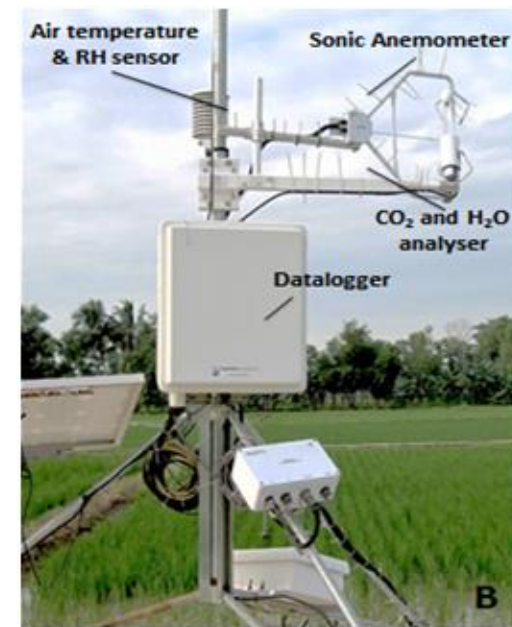
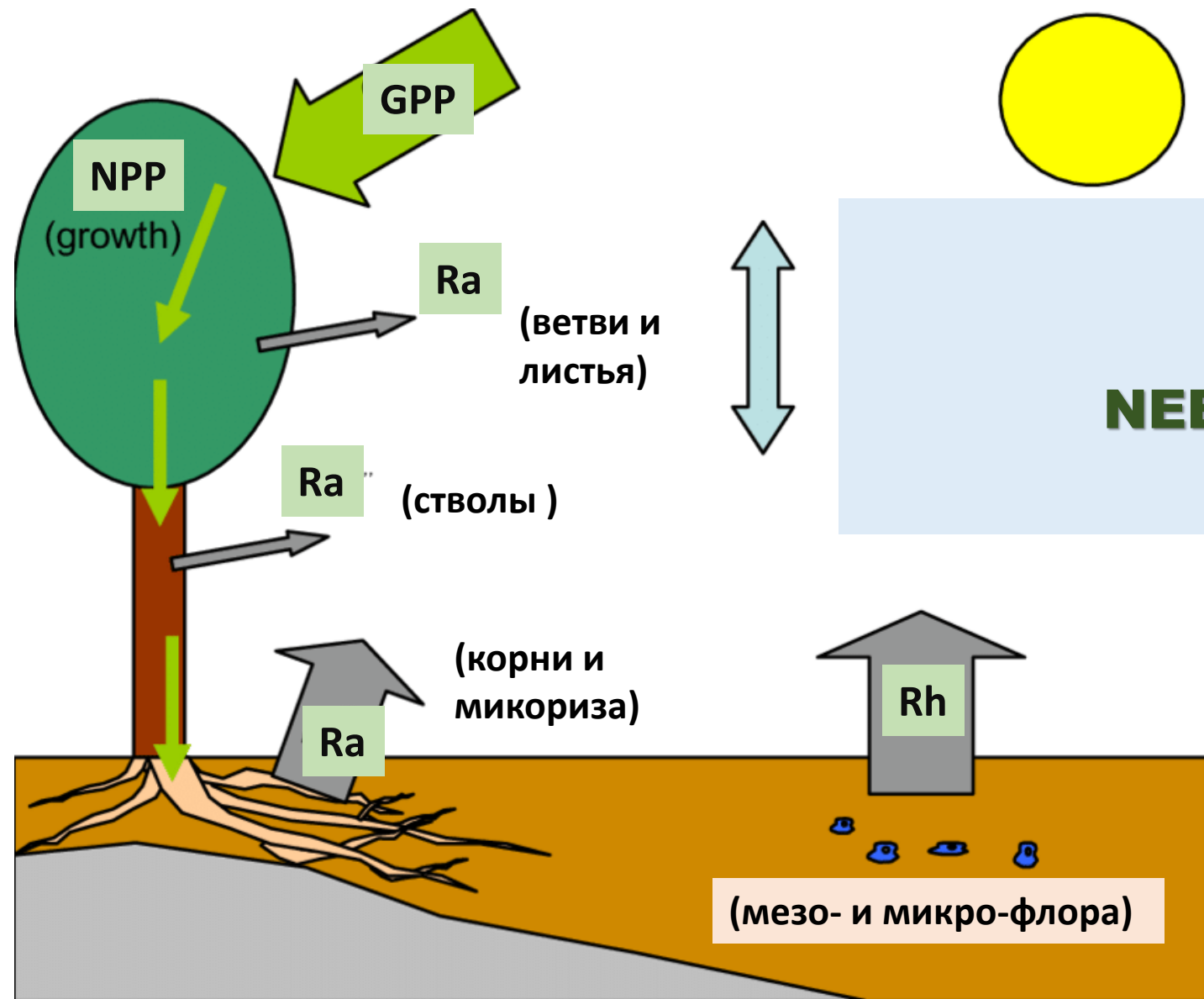
1. *Ершов В.В., Рябов Н.С.* – ИППЭС КНЦ РАН (Апатиты, Мурманская обл.)
2. *Шмакова Н.Ю.* – ПАБСИ КНЦ РАН (Апатиты, Мурманская обл.)
3. *Иванов Д.Г.* – ИПЭЭ РАН (Москва)
4. *Замолодчиков Д.Г., Каганов В.В.* – ЦЭПЛ РАН (Москва)
5. *Сапронов Д.В., Хорошаев Д.А.* – ИФХиБПП РАН (Пущино)
6. *Карелин Д.В.* – ИГ РАН (Москва)
7. *Мошкина Е.В., Мамай А.В.* – ИЛ КарНЦ РАН (Петрозаводск)
8. *Осипов А.Ф., Кузнецов М.А.* – ИБ Коми НЦ УрО РАН
9. *Чумбаев А.С.* – ИПА СО РАН (Новосибирск)
10. *Соколова Л.Г.* – СИФИБР СО РАН (Иркутск)
11. *Белан Б.Д.* – ИОА СО РАН (Томск)
12. *Прокушкин А.С.* – ИЛ СО РАН (Красноярск)
13. *Куприн А.В.* – ФИЦ Биоразнообразие (Владивосток)
14. *Иванов А.В.* – ИГиП ДВО РАН (Благовещенск)
15. *Гончарова О.Ю., Копцик Г.Н., Бобрик А.А., Сорокин А.* – Факультет Почвоведения МГУ (Москва)
16. *Капица Е.А.* – СПбГЛТУ (Санкт-Петербург)
17. *Ильясов Д.В.* – ЮГУ (Ханты-Мансийск)

Приоритетная задача консорциума :
Создание национальной сети наблюдений за
эмиссией CO₂ из почв

в рамках реализации Важнейшего инновационного проекта государственного значения (ВИП ГЗ) *"Разработка системы наземного и дистанционного мониторинга пулов углерода и потоков парниковых газов на территории Российской Федерации, обеспечение создания системы учета данных о потоках климатически активных веществ и бюджете углерода в лесах и других наземных экологических системах»*

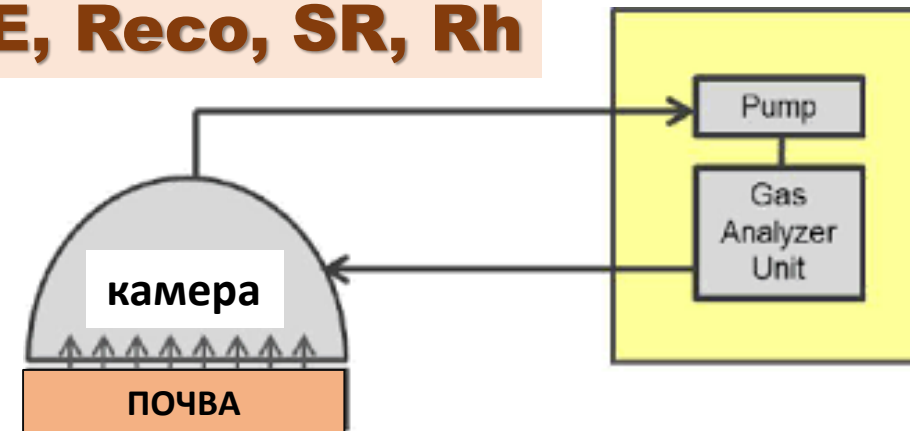
Экосистемные потоки парниковых газов

Метод вихревых пульсаций



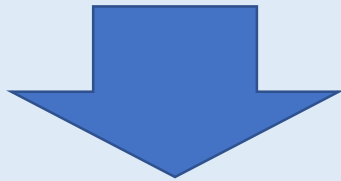
Камерный метод

$NEE, Reco, SR, Rh$



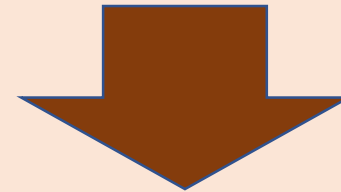
Метод вихревых пульсаций vs камерный метод

- Прямые измерения баланса ПГ в любых экосистемах для больших площадей (футпринт зависит от высоты мачты)
- Непрерывные данные, автоматическая регистрация данных
- Унифицированное сертифицированное оборудование, импортное и очень дорогое
- Сложность установки и обслуживания оборудования, унифицированные расчеты, требующие обучения



Ограниченные возможности расширения сети мониторинга на территории РФ

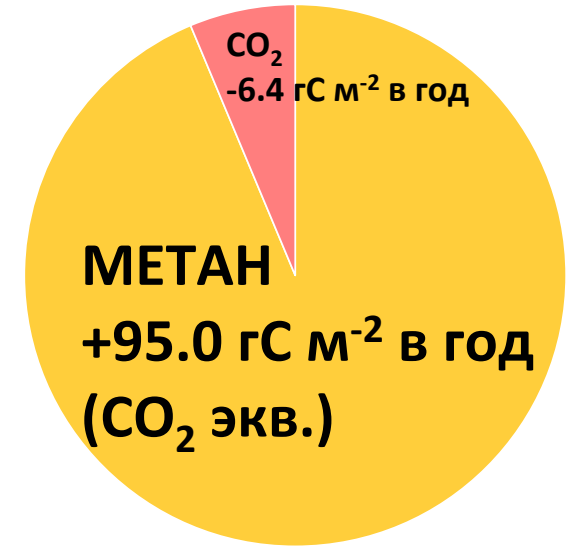
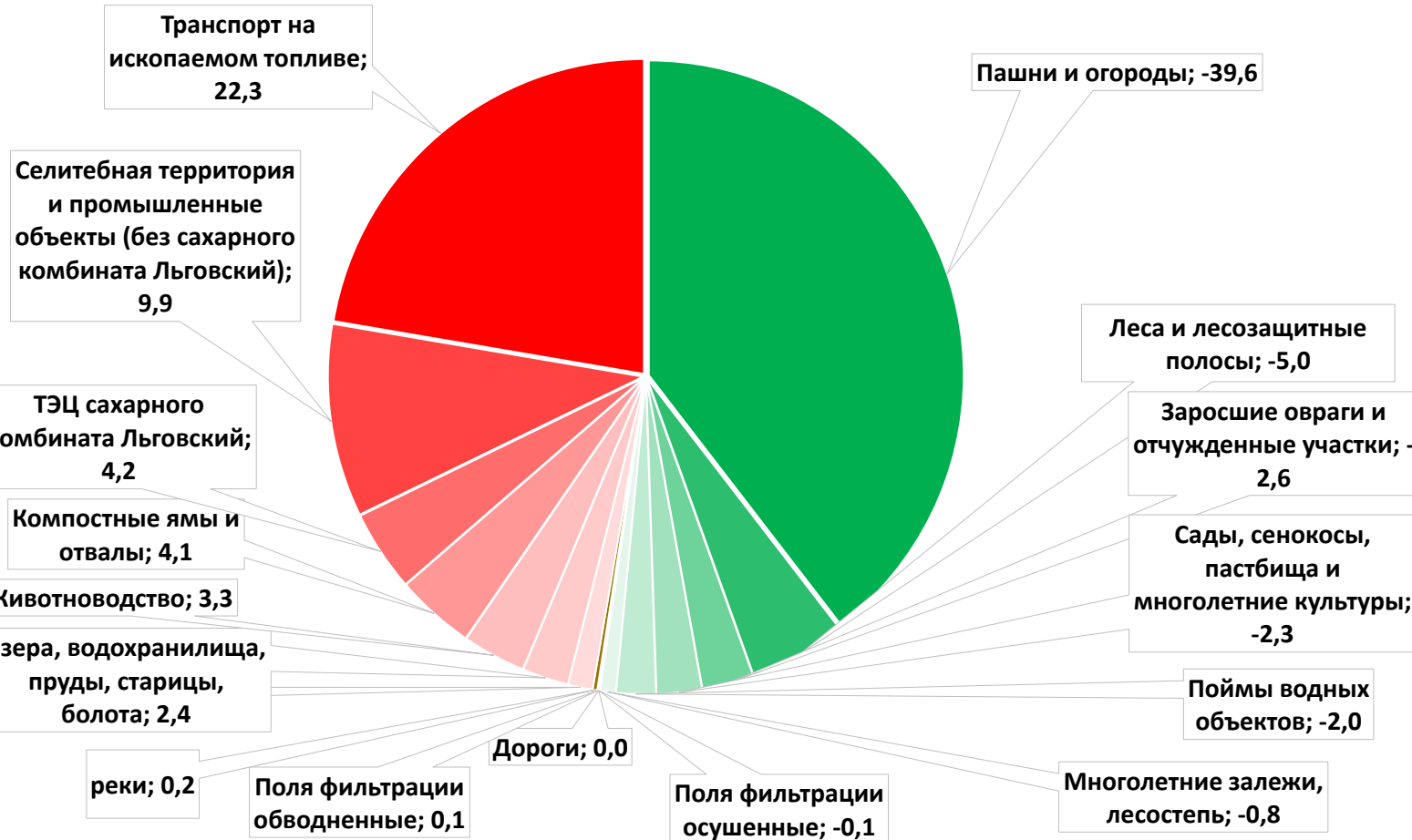
- Прямые измерения баланса возможны не во всех экосистемах. Использование моделей или разностного метода для площадных оценок (футпринт неограничен)
- Непрерывные и/или дискретные данные; автоматическая регистрация возможна
- Оборудование разных производителей, включая недорогие отечественные варианты
- Относительная простота измерений и расчетов, но сложность их унифицирования



Возможность организации широкой сети мониторинга на территории РФ

Оценка нетто-баланса углерода для территории комплексного ландшафта с помощью данных по эмиссии ПГ из почвы и имитационного моделирования

НЕТТО-СТОК CO₂: -6.4 гС м⁻² в год



Расположение действующих в 2023 г. площадок наблюдений за эмиссией CO₂ из почв

КАТАЛОГ | СТАНЦИИ МОНИТОРИНГА | 1



Количество **действующих** площадок мониторинга потоков CO₂ в 2023 году

Действующие площадки

93 участка наблюдений
18 регионов
17 академических организаций



Реализованные цели

СВЯЗЬ

Впервые в рамках единого проекта объединены усилия ведущих академических организаций

МОДЕРНИЗАЦИЯ

Обновлена значительная часть приборной базы, необходимой для проведения наблюдений мирового уровня

УНИФИКАЦИЯ

Разработан методический регламент для определения эмиссии CO₂ из почв, единый для всех участников консорциума и признанный на международном уровне

ИНТЕГРАЦИЯ

Подготовлена структура представления и алгоритмы обобщения экспериментальных данных по эмиссии CO₂ из почв для внедрения в Единую Информационную Систему

ОБЛАСТИ:

Мурманская

Ленинградская

Тверская

Новгородская

Московская

Курская

Астраханская

Тюменская

Новосибирская

Томская

Иркутская

Амурская

Красноярский край

Приморский край

Республика Карелия

Республика Коми

Республика Саха

Ханты-Мансийский Автономный округ

Расположение действующих в 2023 г. площадок наблюдений за эмиссией CO₂ из почв в соответствии с биоклиматическими зонами

Карта **действующих** площадок проведения наблюдений

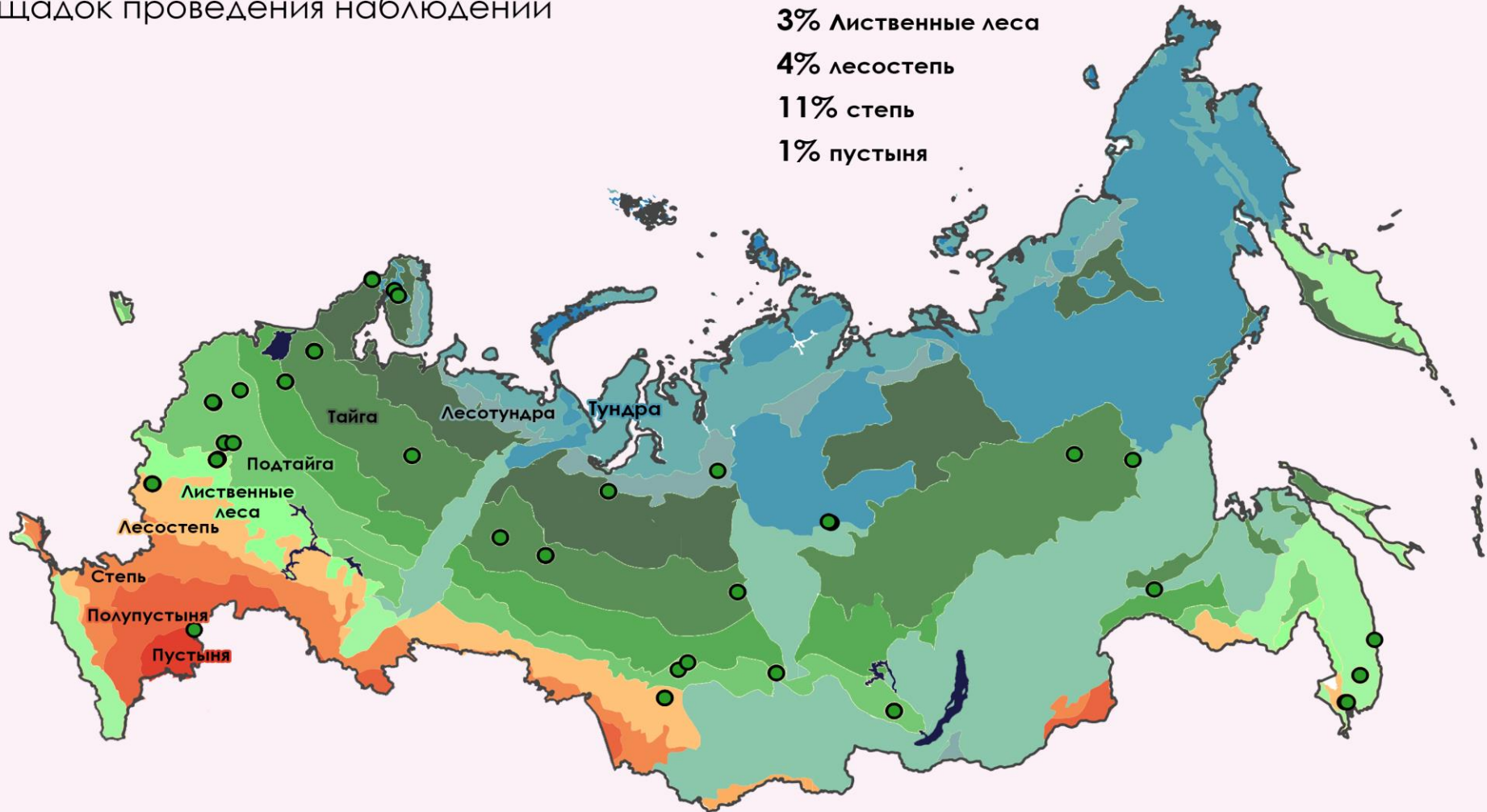
62% тайга и подтайга
(включая северную, среднюю и южную)

3% Лиственные леса

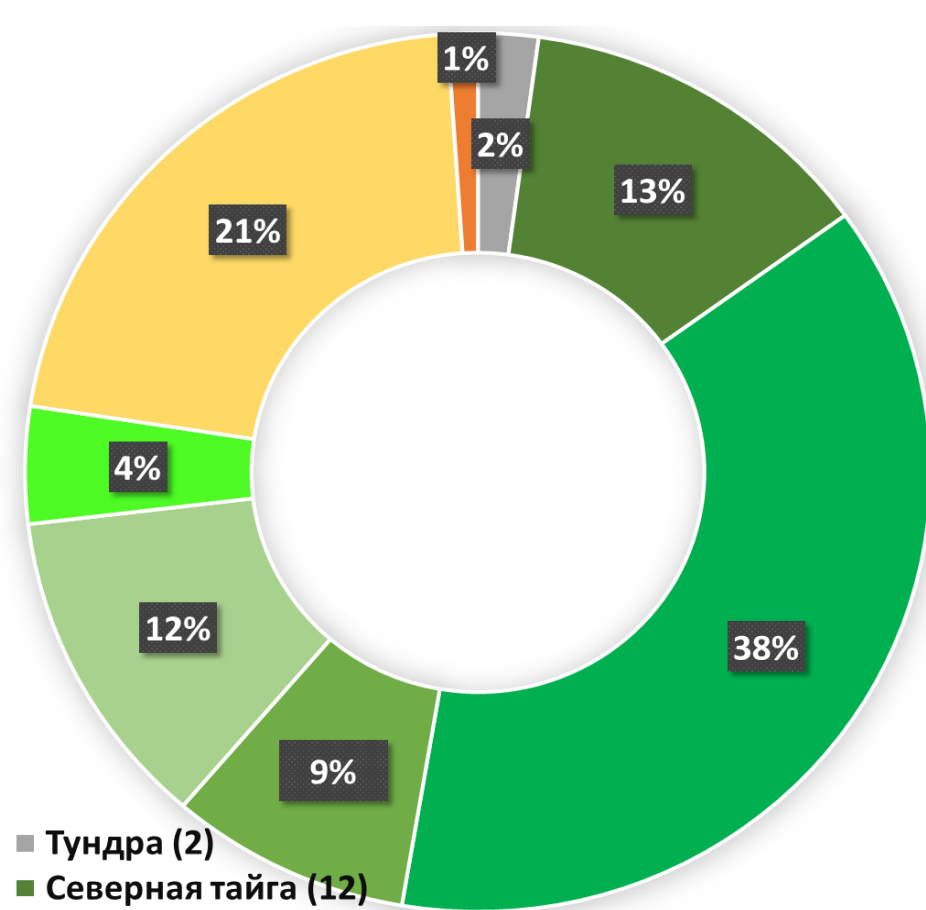
4% лесостепь

11% степь

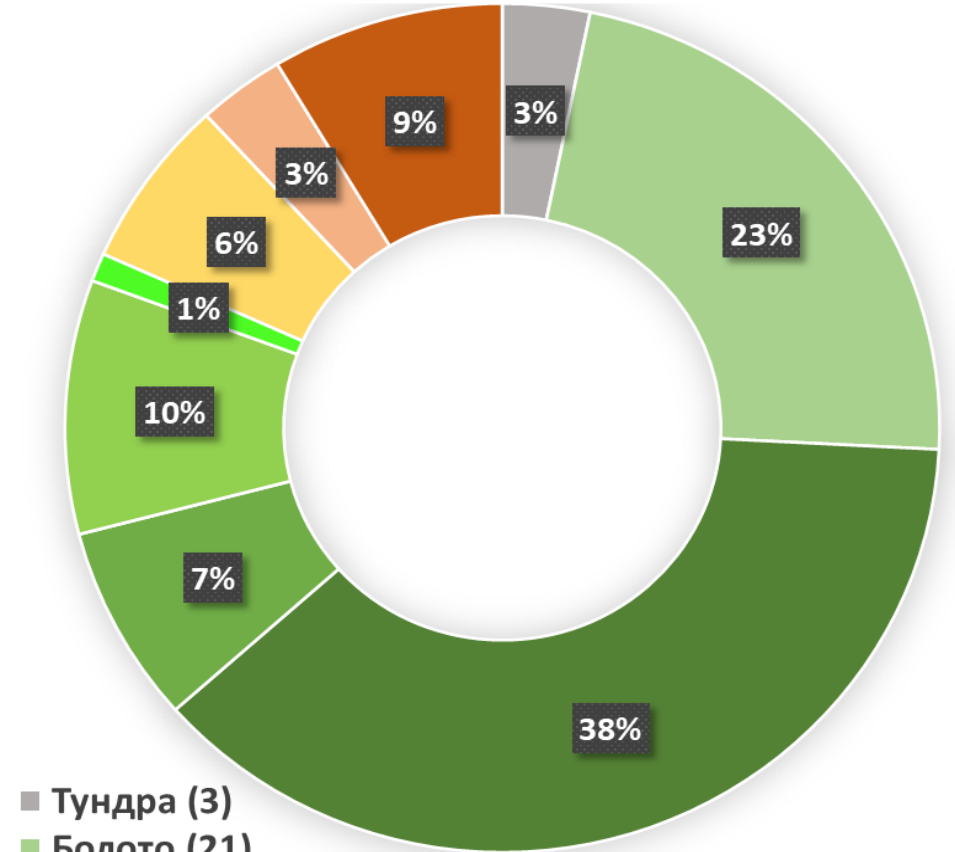
1% пустыня



Распределение площадок наблюдений по природным зонам и экосистемам

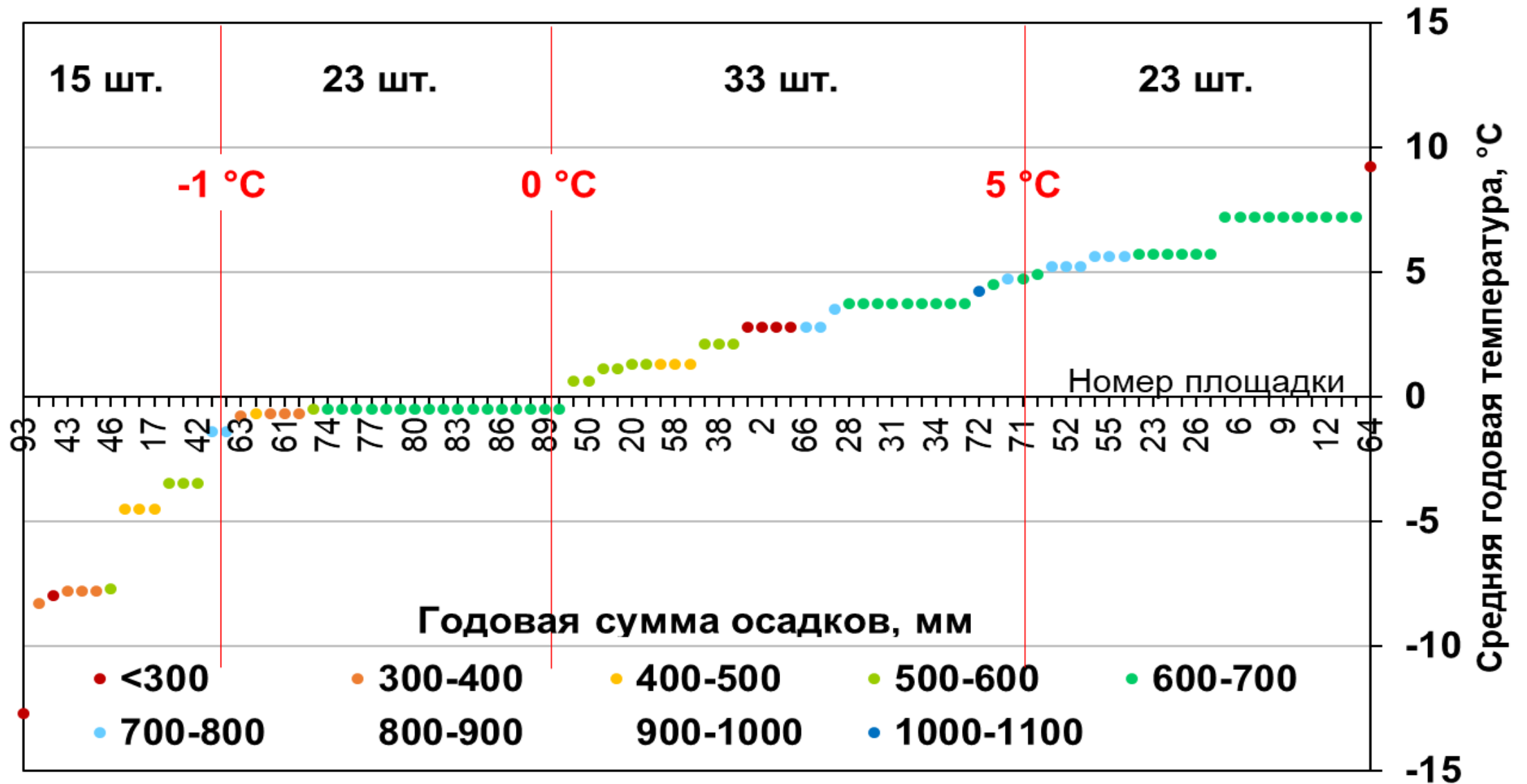


- Тундра (2)
- Северная тайга (12)
- Средняя тайга (35)
- Южная Тайга (8)
- Хвойно-широколиственные леса (11)
- Широколиственные леса (4)
- Лесостепь (20)
- Поупустыня (1)



- Тундра (3)
- Болото (21)
- Лес хвойный (35)
- Лес хвойно-широколиственный (7)
- Лес широколиственный (9)
- Лесостепь (1)
- Луг (6)
- Залежь (3)
- Агроценоз (8)

Распределение площадок наблюдений по климатическим параметрам



Расположение действующих в 2023 г. площадок наблюдений за эмиссией CO₂ из почв в соответствии с биоклиматическими зонами

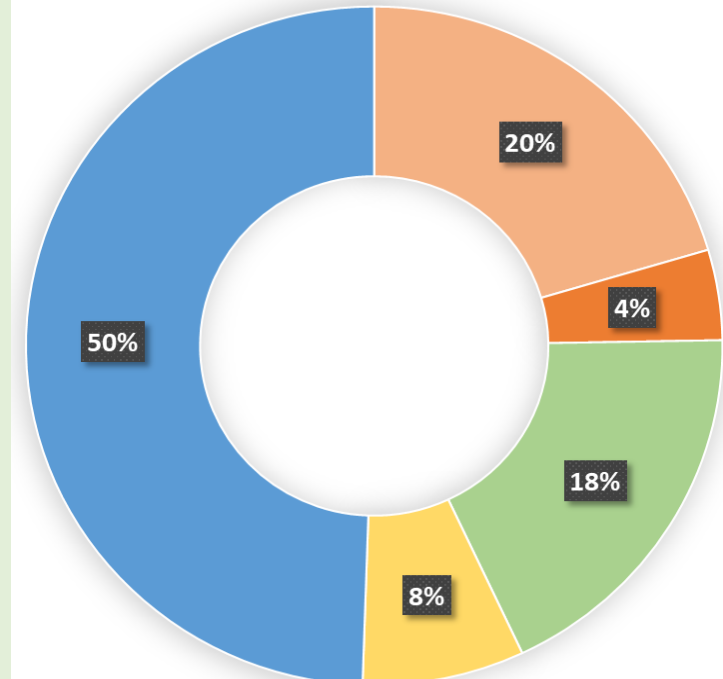
Продолжительность периодов наблюдений на **действующих** площадках мониторинга потоков CO₂



Легенда

Наблюдения проводятся:

-  раз в сезон
-  с июня по август
-  в течение вегетационного периода
-  в течение бесснежного периода
-  круглогодично



-  Единичные (19)
-  Летний (4)
-  Вегетационный (17)
-  Бесснежный (7)
-  Годовой (46)

Факторы, определяющие величину ЭМ_{CO2} из почв

Абиотические

(температура, влажность, свет и т.д.)



Природно-климатическая зона



Биотические

(растения, почва, мезофауна, микробоценоз и т.д.)



Тип экосистемы



Антропогенные

(вырубки, пожары....)

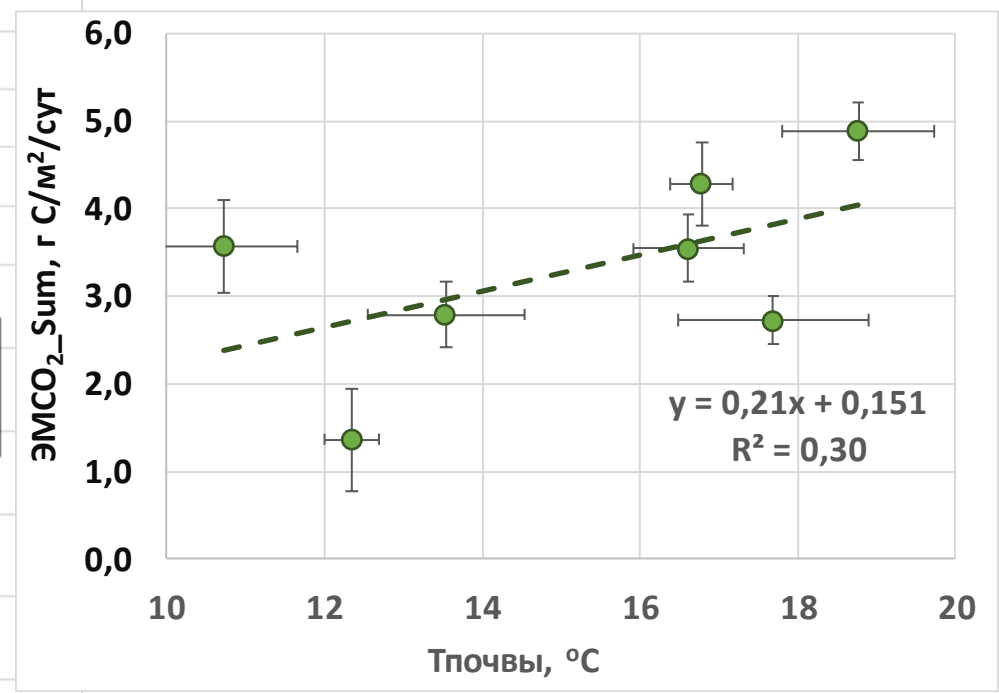
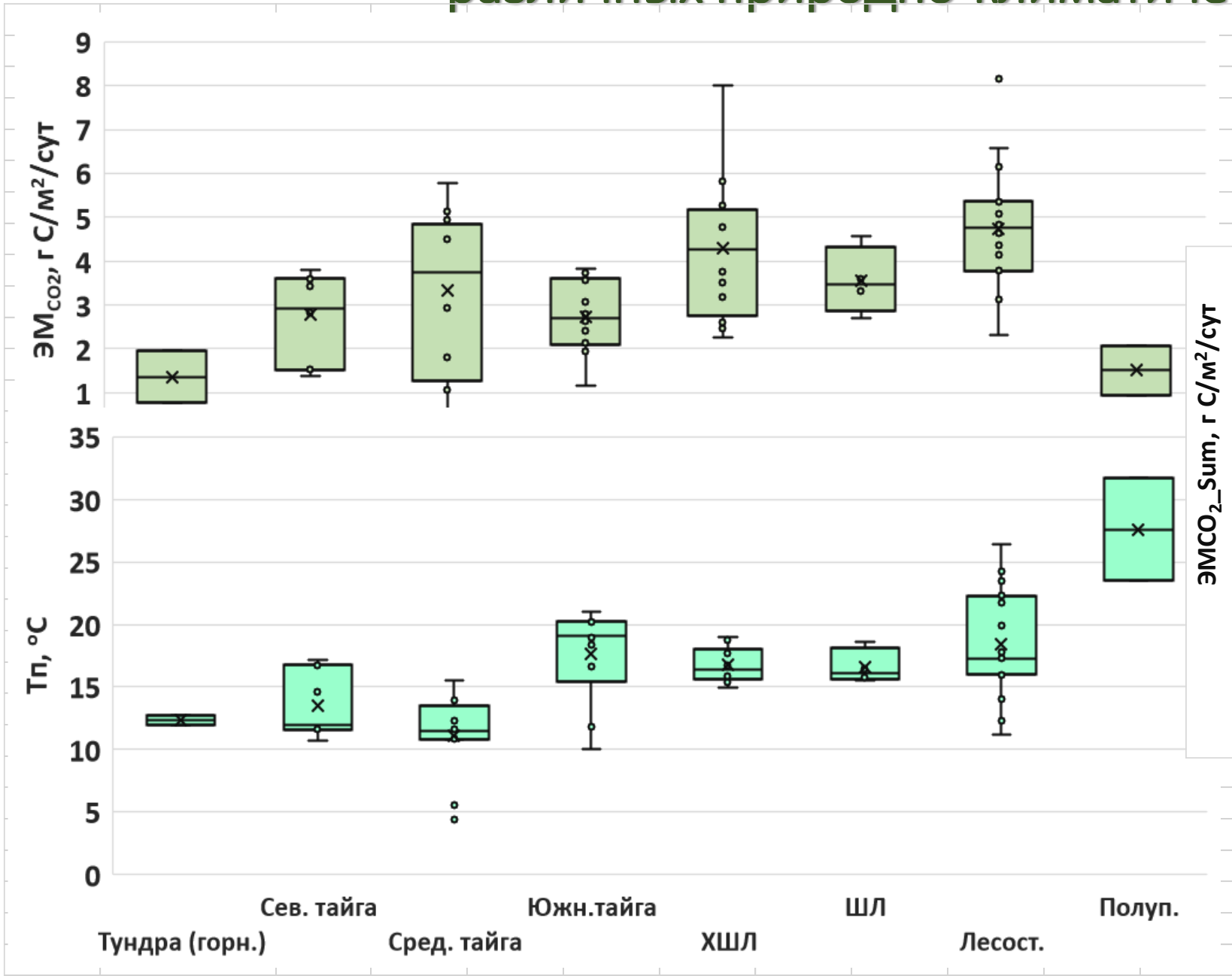


Нарушения

Среднелетняя эмиссия CO₂ из почв и среднелетняя температура почвы в момент измерений (**68** площадок наблюдений)

Максимальная среднемесячная эмиссия CO₂ из почв и средняя температура почвы в момент измерений (**75** площадок наблюдений)

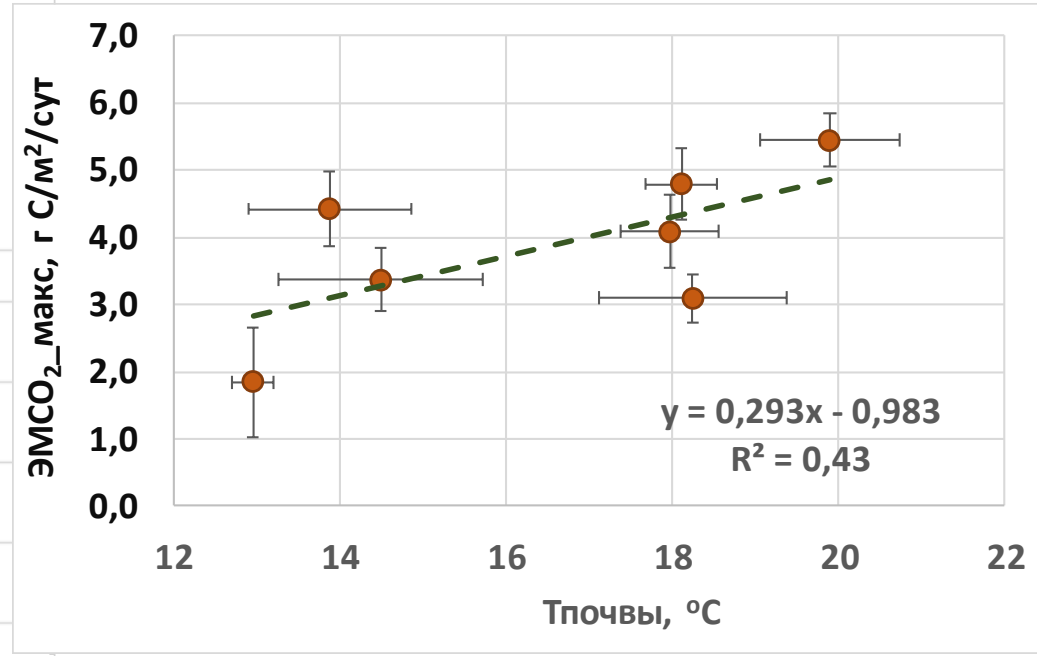
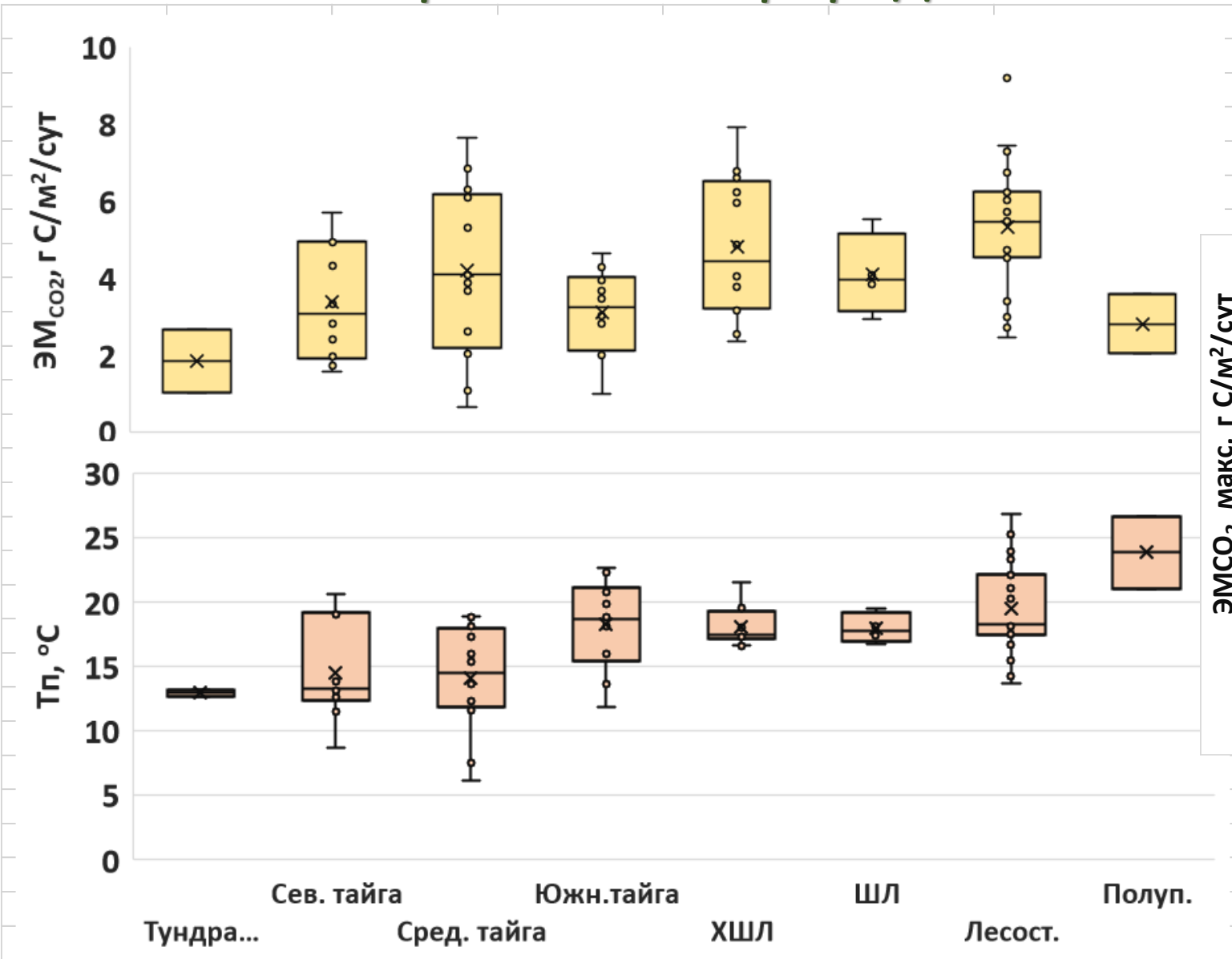
Среднелетняя скорость эмиссии CO₂ из почв и температуры почвы в различных природно-климатических зонах



Статистические параметры среднелетней скорости ЭМ_{CO2}

	Тундра (горн.)	Северная тайга	Средняя тайга	Южная тайга	Хвойно- шир. лес	Широкол. лес	Лесостепь	Полупус- тыня
n	2	7	12	10	12	4	19	2
Mean	1,37	2,79	3,57	2,73	4,28	3,54	4,88	1,51
Median	1,37	2,93	3,75	2,71	4,27	3,46	4,75	1,51
Min	0,78	1,38	0,55	1,16	2,26	2,71	2,31	0,95
Max	1,95	3,81	5,77	3,83	8,01	4,56	8,15	2,07
Max-Min	1,17	2,43	5,22	2,66	5,75	1,85	5,84	1,12
STD	0,83	0,98	1,83	0,85	1,66	0,77	1,40	0,79
SE	0,59	0,37	0,53	0,27	0,48	0,39	0,32	0,56
CI	-	0,90	1,16	0,61	1,06	1,23	0,67	-
CV	60,6	35,0	51,2	31,2	38,8	21,8	28,6	52,5
Cos	0,86	0,87	1,46	0,98	1,34	0,52	1,20	0,74

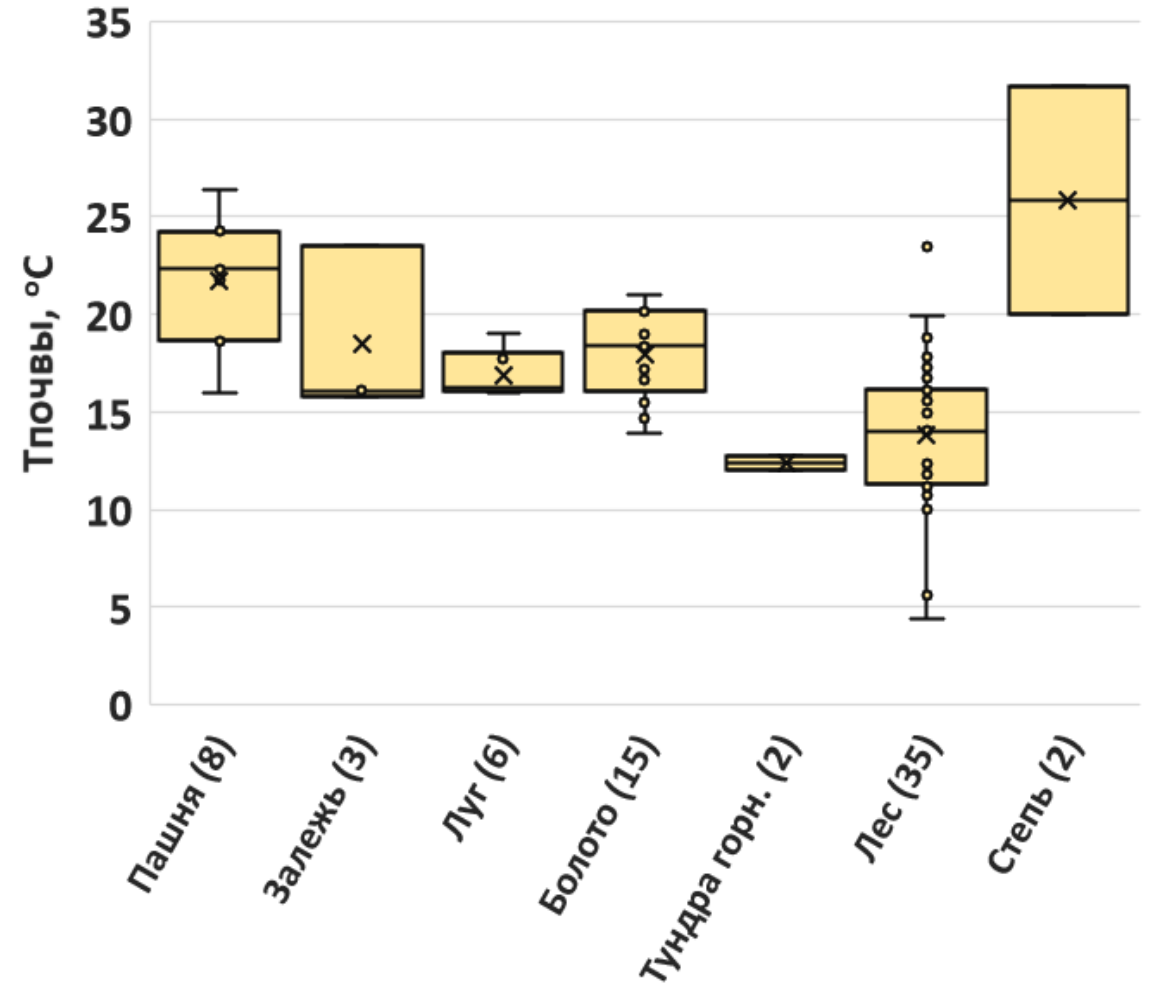
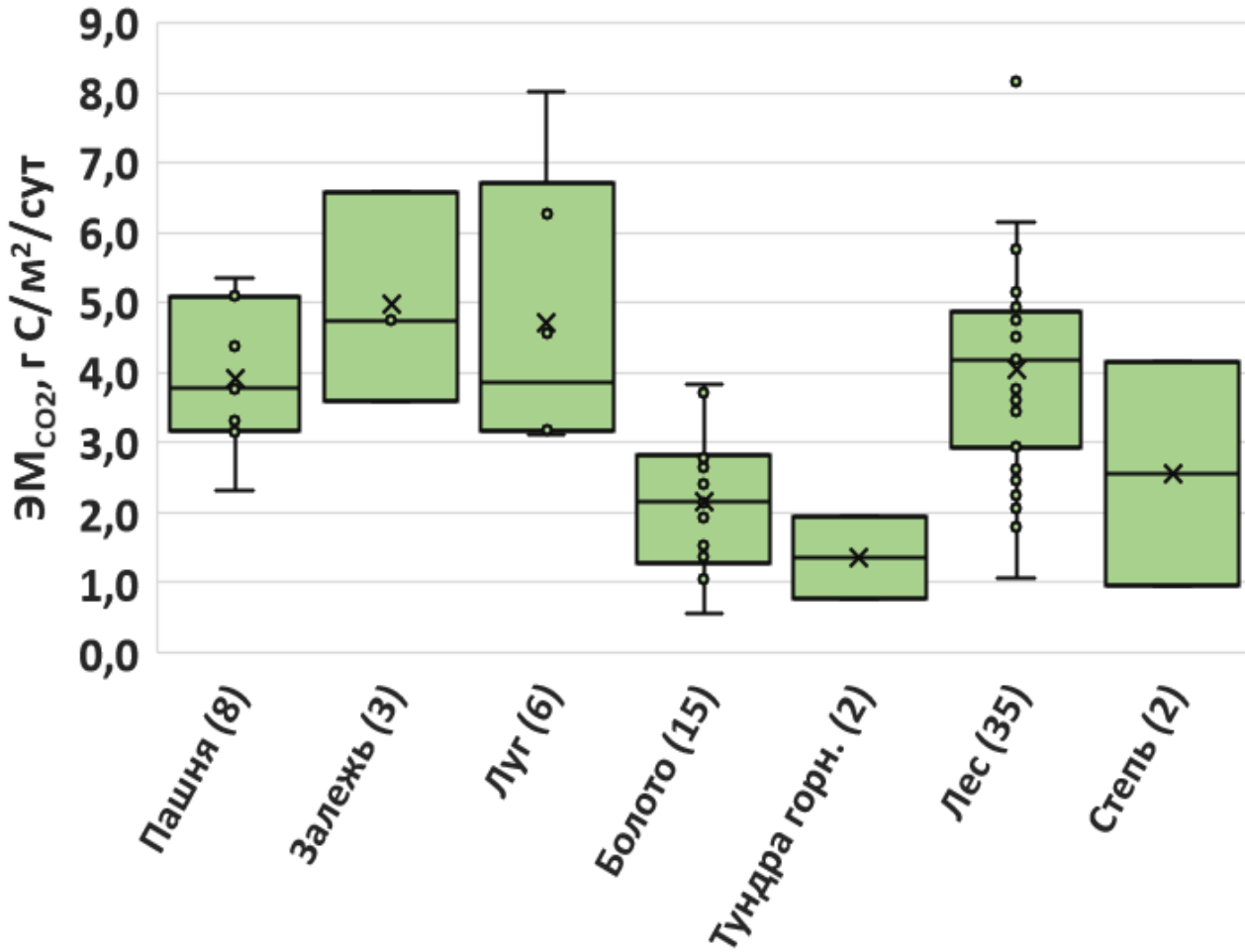
Максимальная скорость эмиссии CO₂ из почв и температуры почвы в различных природно-климатических зонах



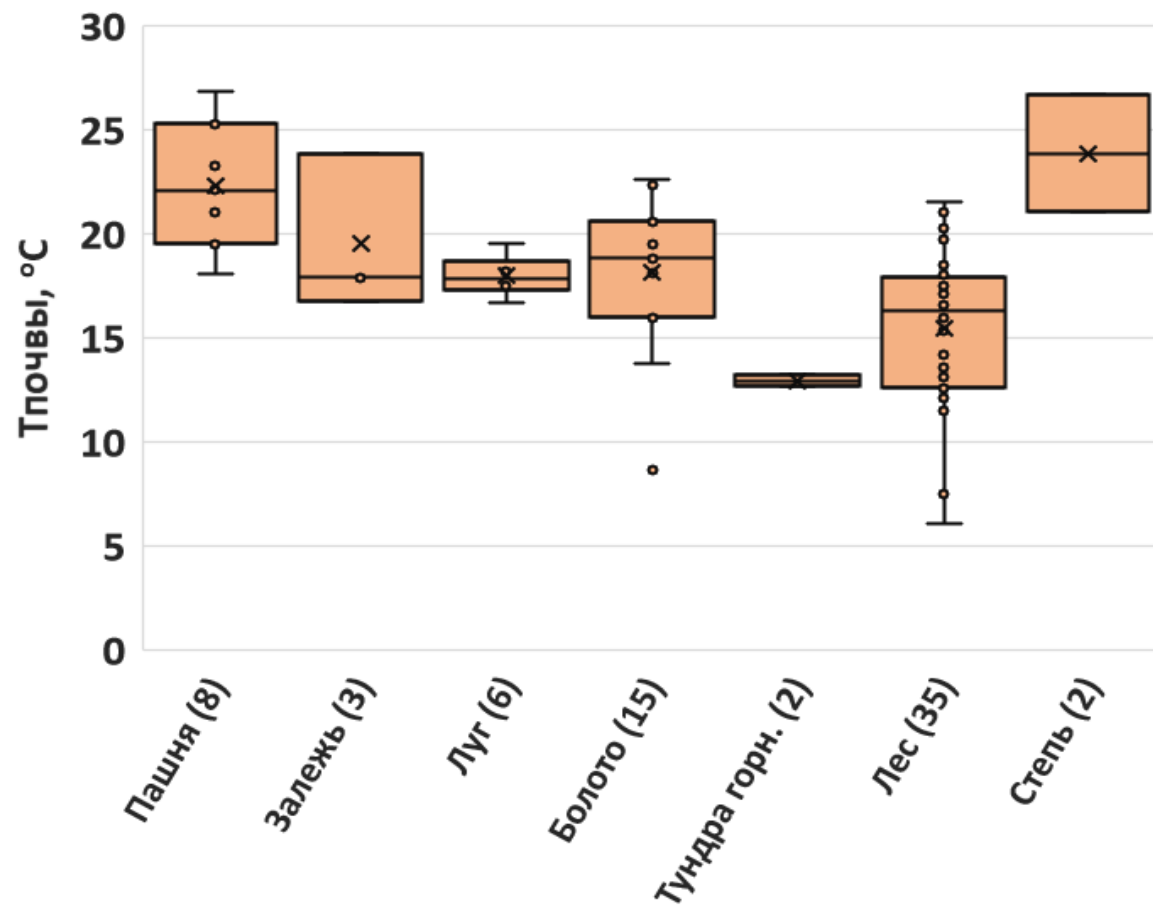
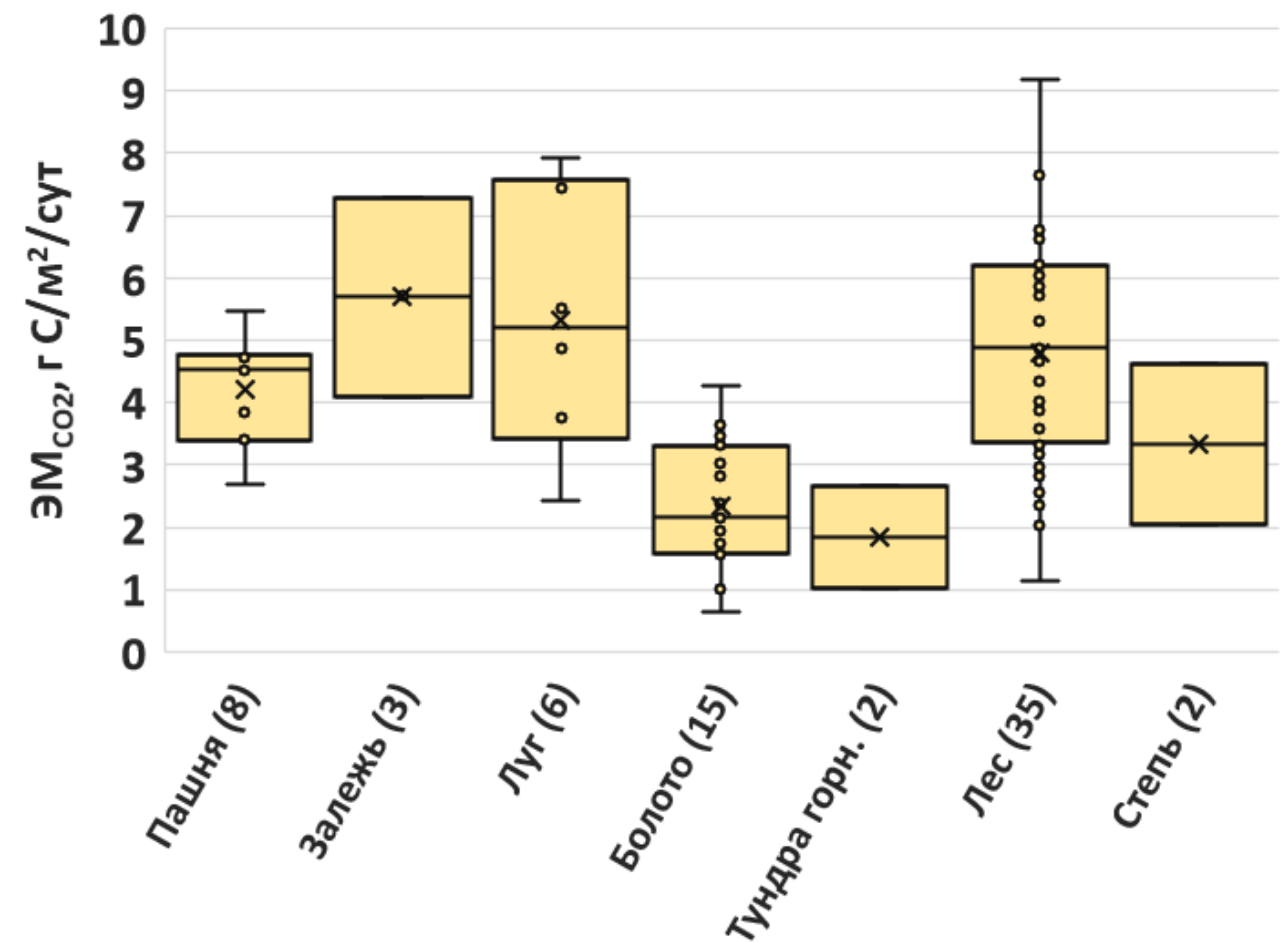
Статистические параметры максимальной скорости ЭМ_{CO2}

	Тундра (горн.)	Северная тайга	Средняя тайга	Южная тайга	Хвойно- шир. лес	Широкол. лес	Лесостепь	Полупус- тыня
n	2	10	16	10	12	4	19	2
Mean	1,84	3,37	4,42	3,10	4,79	4,09	5,45	2,80
Median	1,84	3,06	4,08	3,25	4,44	3,96	5,46	2,80
Min	1,02	1,58	0,64	1,00	2,35	2,92	2,44	2,03
Max	2,66	5,70	7,65	4,65	7,92	5,52	9,18	3,57
Max-Min	1,64	4,12	7,01	3,65	5,57	2,60	6,74	1,54
STD	1,16	1,51	2,21	1,13	1,86	1,08	1,74	1,09
SE	0,82	0,48	0,55	0,36	0,54	0,54	0,40	0,77
CI	10,42	1,08	1,18	0,81	1,18	1,71	0,84	9,78
CV	63,0	44,8	49,9	36,6	38,8	26,3	31,8	38,8
Cos	0,89	1,22	1,59	1,18	1,16	0,64	1,24	0,55

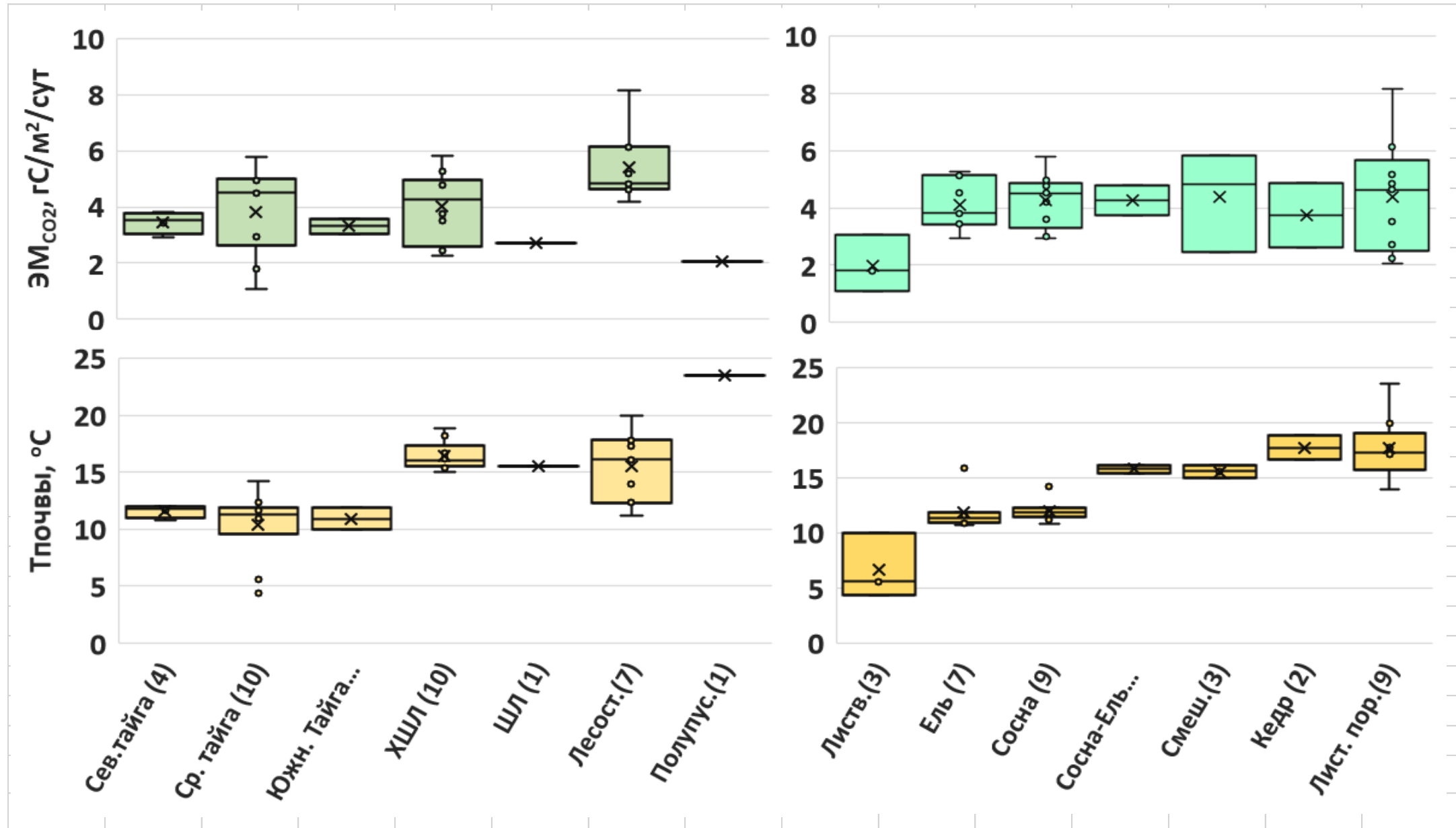
Среднелетняя скорость эмиссии CO₂ из почв и температура почвы в различных типах экосистем



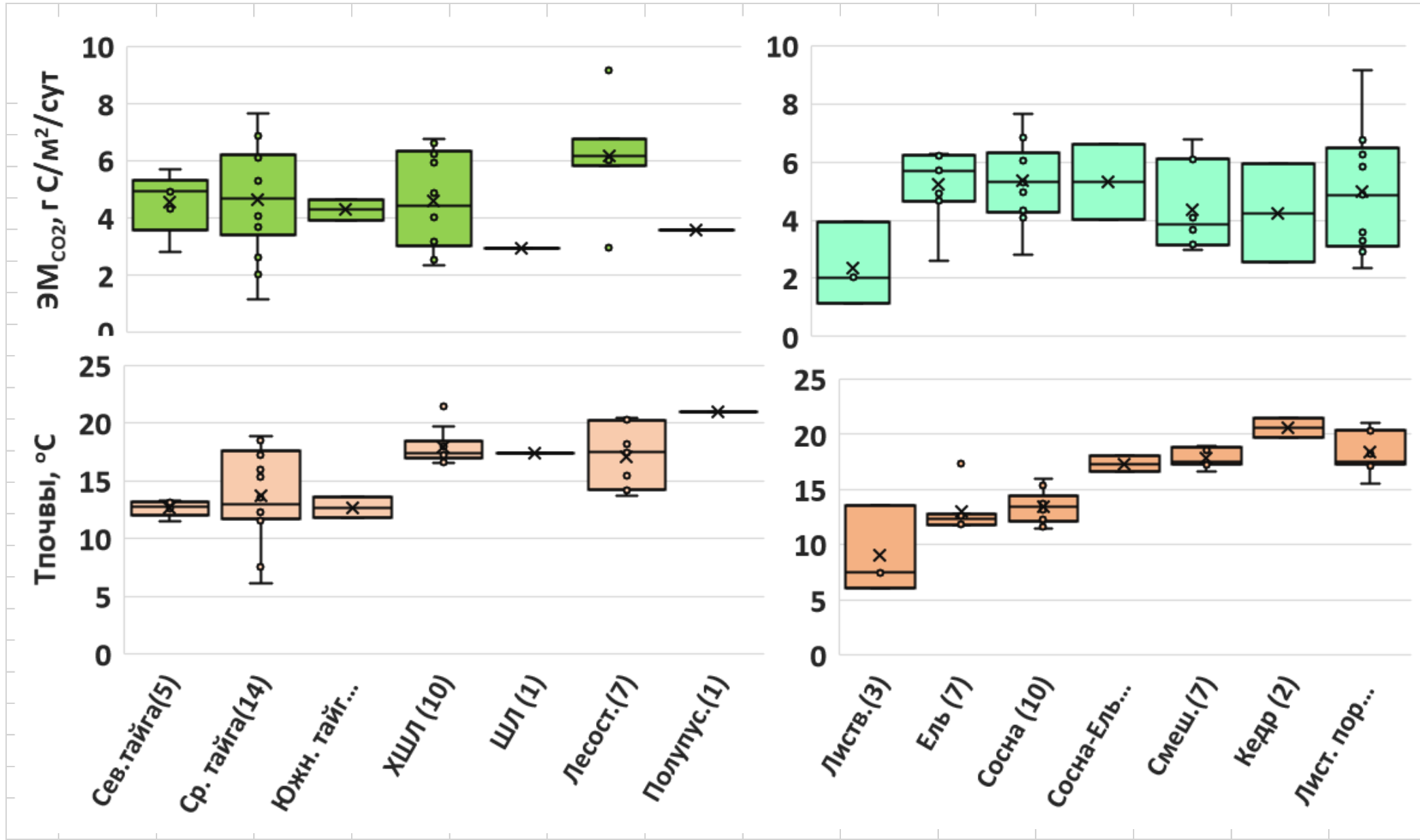
Максимальная скорость эмиссии CO₂ из почв температура почвы в различных типах экосистем (75 экосистем)



Среднеголетняя скорость эмиссии CO₂ из почв и температура почвы в различных типах лесных экосистем



Максимальная скорость эмиссии CO₂ из почв и температура почвы в различных типах лесных экосистем

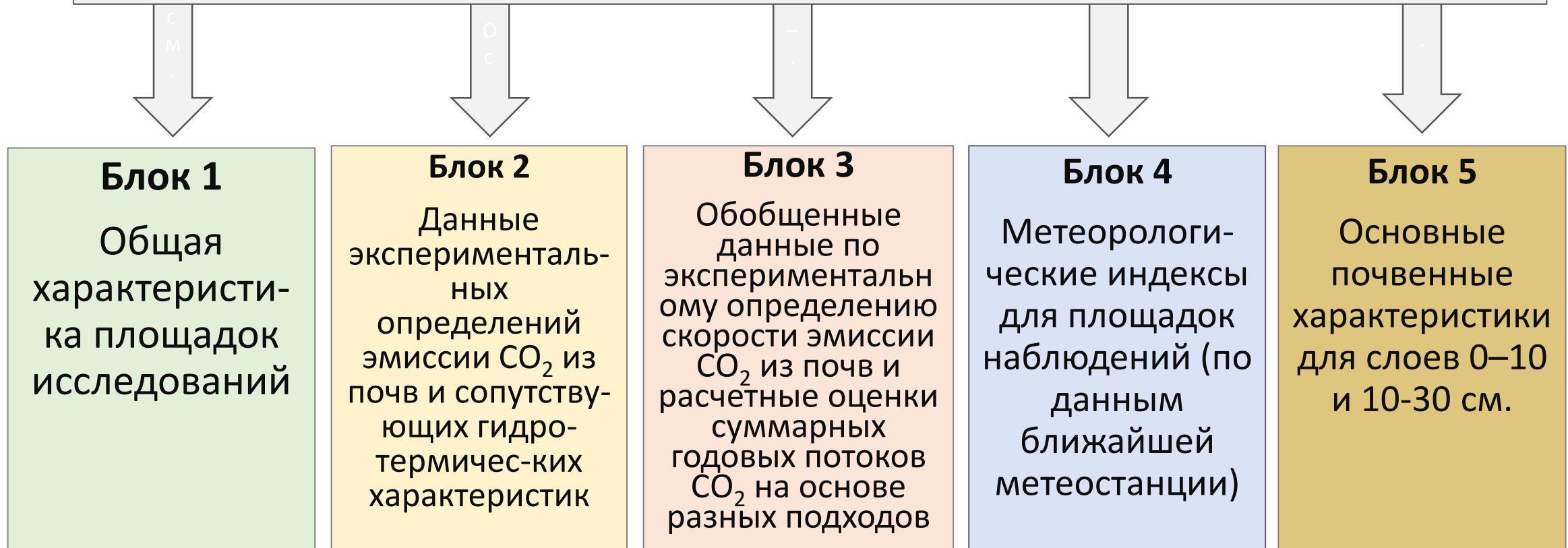


Предварительные выводы по результатам 2023 г.:

- От тундры до лесостепи (10-20⁰С) прослеживается влияние температуры на значения среднелетней и максимальной среднемесячной эмиссии CO₂ из почв;
- Тундровые и болотные экосистемы характеризуются самыми низкими значениями среднелетней и максимальной среднемесячной эмиссии CO₂ из почв;
- Среди лесных экосистем наименьшая эмиссионная активность характерна для лиственничников (породный состав), а максимальная - для зоны лесостепи.

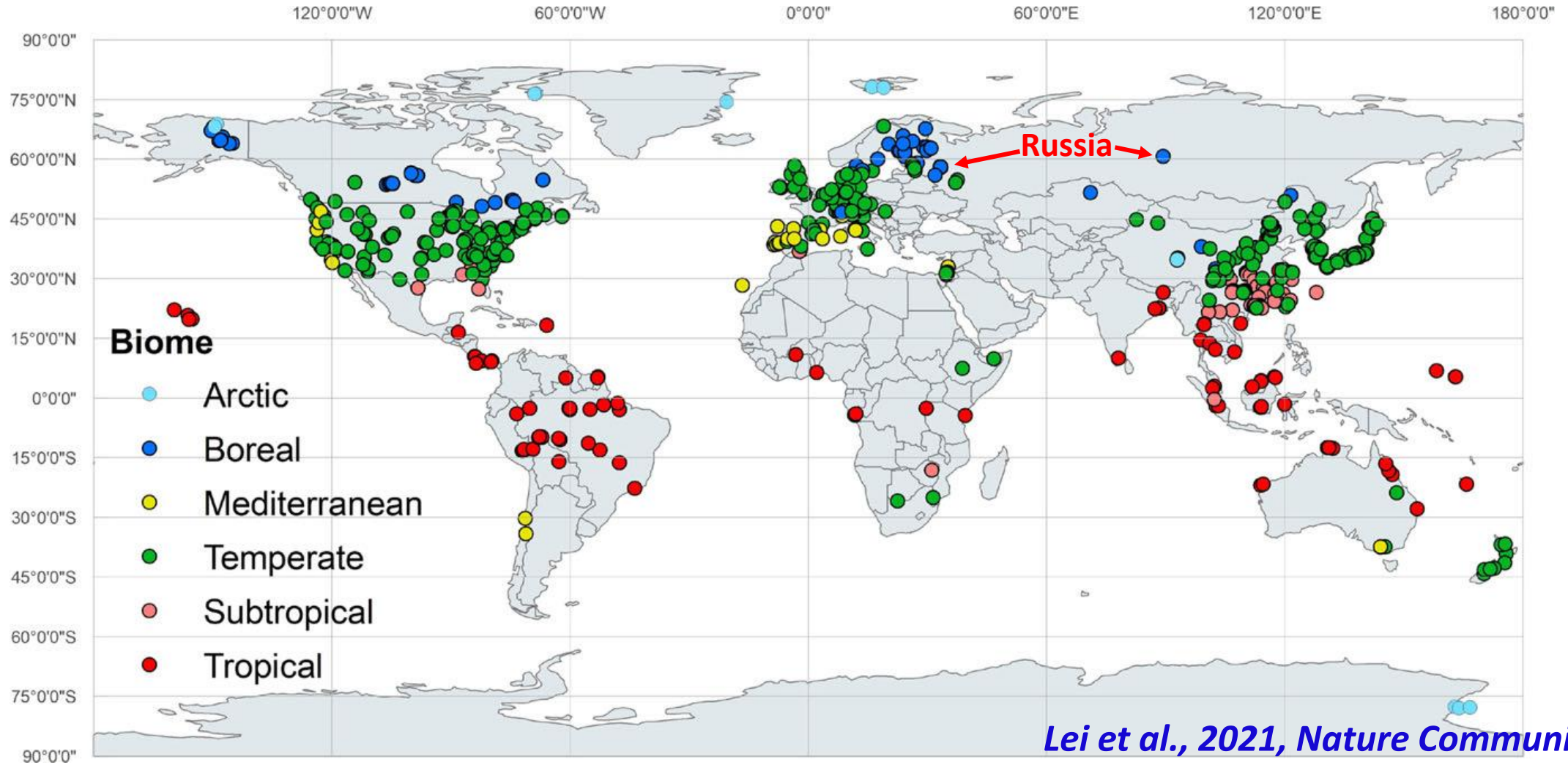
Задача: включение в общую ИАС «Углерод-Э» и в мировую БД по дыханию почв

Структура базы данных по эмиссии CO₂ из почв в наземных экосистемах России



Включает > 90 различных параметров!

Географическое распределение данных по почвенному дыханию – глобальная Soil Respiration Data Base



(SRDB содержит результаты 2428 наблюдений из 693 опубликованных работ)

Структура мировой базы данных по дыханию почв 2021 г.

[A Global Database of Soil Respiration Data, Version 5.0 \(ornl.gov\)](https://doi.org/10.3334/ORNLDAAC/1827); A Global Database of Soil Respiration Data, Version 5.0. ORNL DAAC, Oak Ridge, Tennessee, USA. <https://doi.org/10.3334/ORNLDAAC/1827>

Основные параметры БД по дыханию почв

Record_number	Elevation	Soil_BD	Means_interval	Rs_wet	TotDet_flux
Entry_date	Manipulation	Soil_CN	Annual_coverage	Rs_dry	Ndep
Study_number	Manipulation_level	Soil_sand	Partition_method	RC_seasonal	LAI
Author	el	Soil_silt	Rs_annual	RC_season	BA
Duplicate_record	Age_ecosystem	Soil_clay	Rs_annual_err	GPP	C_veg_total
Quality_flag	Age_disturbance	MAT	Rs_interann_err	ER	C_AG
Contributor	Species	MAP	Rlitter_annual	NEP	C_BG
Country	Biome	PET	Ra_annual	NPP	C_CR
Region	Ecosystem_type	Study_temp	Rh_annual	ANPP	C_FR
Site_name	Ecosystem_state	Study_precip	RC_annual	BNPP	C_litter
Site_ID	Leaf_habit	Meas_method	Rs_spring	NPP_FR	C_soilmineral
Study_mid_year	Stage	Collar_height	Rs_summer	TBCA	C_soildepth
Years Of Data	Soil_type	Collar_depth	Rs_autumn	Litter_flux	Notes
Latitude	Soil_drainage	Chamber_area	Rs_winter	Rootlitter_flux	
Longitude		Time_of_day	Rs_growing season		

Включает 85 различных параметров!

Методическое руководство по определению эмиссии CO₂ из почв в различных экосистемах и краткая инструкция

др., 2020, 2022), на каждом участке наблюдений рекомендуем установить не менее 5 камер. Их можно расположить по трансекте 10-20 или более метров, с расстоянием 2-4 м (или более) между камерами. Сами камеры устанавливаются между травянистыми растениями, а при необходимости зеленые части травы перед установкой камер срезают. Лесную подстилку (и свежий опад в осенний период) с поверхности почвы не удаляют. Таким образом, измеряемый эмиссионный поток CO₂ из почв характеризуют общее дыхание с поверхности почвы, за исключением дыхания зеленых частей растений.

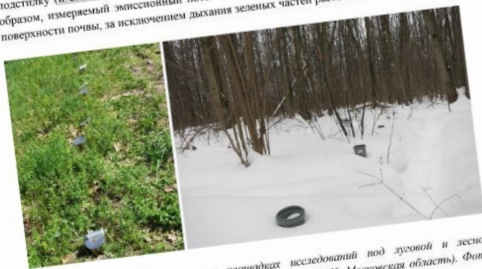


Рис. 4. Расположение камер на площадках исследований под луговой и лесной растительностью на серой лесной почве (ИФХиБПП РАН, Московская область). Фото И.И. Кургановой, Д.В. Свиридова.

Наиболее удобным и доступным видом измерительных камер в настоящее время являются трубы ПВХ диаметром 110 мм и высотой 10 или 20 см, врезанные в почву на глубину от 4 до 6 см. Камера накрывается крышкой, снабженной резиновыми манжетами, поставляющимися вместе с трубами, что обеспечивает необходимую герметичность камеры.

Анализ данных по определению ежедневной динамики эмиссии CO₂ из почв, проведенной А.А. Ларионовой в конце 1980-х годов в ИФХиБПП РАН показал, что еженедельное проведение измерений эмиссии CO₂ из почв является оптимальной частотой для получения адекватных оценок месячных и сезонных потоков CO₂ из почв (Курганова, Кудеков, 1998), а 2 раза в месяц – это минимальная частота измерений. Проведение измерений в солнечную погоду на открытых площадках (агроценозы, луговые и степные экосистемы) желательно проводить в утренние часы (8-11 час), особенно в течение вегетационного сезона, когда прогрев почвы к полудню может сильно влиять на интенсивность ЭМ_{СО2} из почв. В эти часы скорость ЭМ_{СО2} из почв наиболее близка к среднесуточной (Ларионова, Розанова, 1993а). В пасмурные дни и в лесных насаждениях с прореживанием покрытия более 70% измерения ЭМ_{СО2} из почв можно проводить в течение всего светового дня (Смирзалов, 2022).



Национальная система мониторинга
пулов углерода и потоков парниковых газов
на территории Российской Федерации

МЕТОДИЧЕСКОЕ РУКОВОДСТВО

по определению эмиссии CO₂ из почв
в различных типах экосистем



Пуцупо – 2022 г.



Методические проблемы и другие трудности:

- *Разная частота наблюдений! Унифицировать очень трудно из-за логистических проблем.*
- *Оптимальное число повторностей для охвата пространственной неоднородности vs длительность отбора проб без влияния внутрисуточной динамики*
- Унификация расчетов среднемесячных, сезонных и годовых потоков CO₂ из почв. Подходы на основе:
 - (i) температурных зависимостей (по непрерывным данным T_p с логгеров)
 - (ii) простых моделей (T&P – разные) или имитационных моделей;
- *Глубина измерения T_{почвы}; 5 см – оптимальная; Для влажности почвы???*
- *Провести сравнение результатов, полученных разными приборами (Licor, Picarro, AZ/VentPro, Хроматограф) - ИГ РАН;*
- *Разная техника измерений (срезание растительности на болотах и травяных экосистемах), момент начала измерений после установки камер и т.д.*
- *Измерения в снежный (морозный) период;*
- *Определение гетеротрофной составляющей общей эмиссии CO₂ из почв (метод исключения корней).*

Перспективы:

- *Провести оценку годовых потоков CO₂ из почв и баланса C в экосистемах с целью их сравнения с данными, полученными методом вихревых пульсаций;*
- *Анализ структуры годовых потоков CO₂ из почв;*
- *Подготовить результаты измерений 2022/2023 гг. согласно предложенной структуре базы данных для включения в единую ИАС «Углерод-Э»;*
- *Необходимо расширение исследований, в первую очередь, в степных и тундровых зонах, как наименее представленных в существующей сети наблюдений за эмиссией CO₂ из почв;*
- *Постепенная интеграция в мировую базу данных по дыханию почв (SRDB);*
- *Рабочее совещание по методическим вопросам с обсуждением данных весной 2024 г.*

Благодарю за внимание!



<https://ritm-c.ru>
<http://carbomonitoring.ru>



- Измерения эмиссии парниковых газов из почвы могут служить важной альтернативой (и одновременно независимой проверкой) для метода вихревой ковариации. Последний метод безусловно необходим как единственный прямой метод измерения баланса ПГ *in situ* и только он может давать подробную картину их внутригодовой динамики, но в качестве альтернативной замены при объективной невозможности использования эдди ковариации или градиентного метода на основе внутригодовых данных по эмиссии CO₂ (и балансу между почвой и атмосферой других ПГ) эти данные могут служить основой для моделирования C-баланса для большой территории, и в частности для футпринта климатических вышек даже при их отсутствии т.к. можно рассчитать площадь «футпринта» и без оборудования которое допустим только планируется к установке.
- В этом случае можно рассчитать нетто-баланс для экосистем попавших в пределы максимального футпринта для данной высоты размещения измерительного оборудования, например 40 м. Тогда для этой площади можно уже сейчас оценивать нетто-баланс углерода и ПГ на основе комплекса моделей которые наиболее подходят для описания баланса в пределах конкретных экосистем входящих в «футпринт». Примером может служить оценка нетто-баланса проведенная для площади Льговского района Курской области (институт географии, Карелин) для 2021 г. В этом случае баланс например в агроэкосистемах считали по культурам и площадям пашен по модели DNDC а параметризовали ее по данным дыхания почвы, или по лесам и лесостепям на этой территории это делалось через разницу NPP (она оценивалась по другим моделям) и микробного дыхания почвы, плюс сюда добавляли данные по эмиссии метана и CO₂ из точечных источников (например, компостные хранилища или поля фильтрации) или с поверхности водоемов.
- В данном случае это было сделано для более чем 1000 км² для административного района, но аналогично и намного проще это же можно делать ежегодно для оценки C-баланса площади футпринта даже до размещения требуемого оборудования, которое в условиях санкций на его покупку, крайне высокой стоимости и сложности освоения еще неизвестно когда появится и заработает (если говорить о новых точках его размещения). Кроме того, даже после начала его работы требуется отладка и проверка его результатов альтернативными методами что как раз и может обеспечить данные по эмиссии из почвы и соответствующие для каждой из входящих в область (максимального, теоретического) футпринта экосистем - модели. В качестве заведомо достаточного (включающего будущий расчетный после начала измерений на вышке) размера такого футпринта можно пока использовать эмпирическое правило: 1 м высоты размещения оборудования «эдди» над оцениваемой поверхностью соответствует 100 м радиуса футпринта.