Уральский федеральный университет

Оценка потоков углерода в экосистемах Московской области с использованием модели машинного обучения и спутниковых данных

Сухих Г.А.[1], Розанов А.П.[2], Грибанов К.Г.[1], Захаров В.И.[1]

[1]Уральский федеральный университет, пр. Ленина, 51, г. Екатеринбург, 620000, Россия
[2]Университет Миннесоты, 100 Черч-стрит, г. Миннеаполис, 55455, США

Актуальность

Проблема глобального потепления связана с ростом концентрации парниковых газов, в первую очередь CO_2, в атмосфере.

В связи с этим актуальной является задача оценки потенциала различных экосистем (особенно лесных) к поглощению (секвестрации) атмосферного CO_2. Важно решать эту задачу как в глобальном, так и в региональном масштабах.

Цель данного исследования – оценка годового баланса природных потоков CO_2 на территории Московской области за 2020–2022 гг. и оценка вклада каждого типа растительности в этот баланс.

Предмет и методы исследования

Потоки углерода (C) в природных сообществах на территории Московской области. Период исследования: 2020-2022 годы.

Эмпирические модели машинного обучения являются перспективным инструментом для оценок потоков углерода в растительных сообществах.

В работе апробируется оригинальная модель машинного обучения NorthFlux [1-3] для оценки величин поглощения углекислого газа из атмосферы и его эмиссии экосистемами с использованием спутниковых данных. Приводится сравнение оценок секвестрационного потенциала экосистем Московской области, Томской области и субъектов Уральского федерального округа.

Входные данные модели:

1. Спектральные данные спутникового сенсора MODIS (продукт MOD09 CMG)
2. Метеоданные ретроспективного климатического анализа (ERA5).
3. Данные MODIS (продукт MCD12C1 v061) по классификации растительности подстилающей поверхности.

1. Розанов А. П. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023682424 NorthFlux. Дата регистрации в Реестре программ для ЭВМ 25 октября 2023 г.

2. Rozanov, A.P., Zadvornykh, I.V., Gribanov, K.G., Zakharov V.I. Estimates of Carbon Dioxide Flux into the Forest Ecosystem Based on Results of Ground-Based Hyperspectral Sounding of the Atmosphere and an Artificial Neural Network Model. // Atmospheric and Oceanic Optics 37, 199–204 (2024). https://doi.org/10.1134/S1024856024700246

3. Розанов А. П., Грибанов К. Г., Задворных И. В., Сухих Г. А., Валдайских В. В., Захаров В. И. Оценки трансграничного переноса и баланса потоков атмосферного CO_2 на территории Свердловской области с использованием модели машинного обучения. // Оптика атмосферы и океана. 2025. Т. 38. № 12. С. 1031–1037. DOI: 10.15372/AOO20251210.

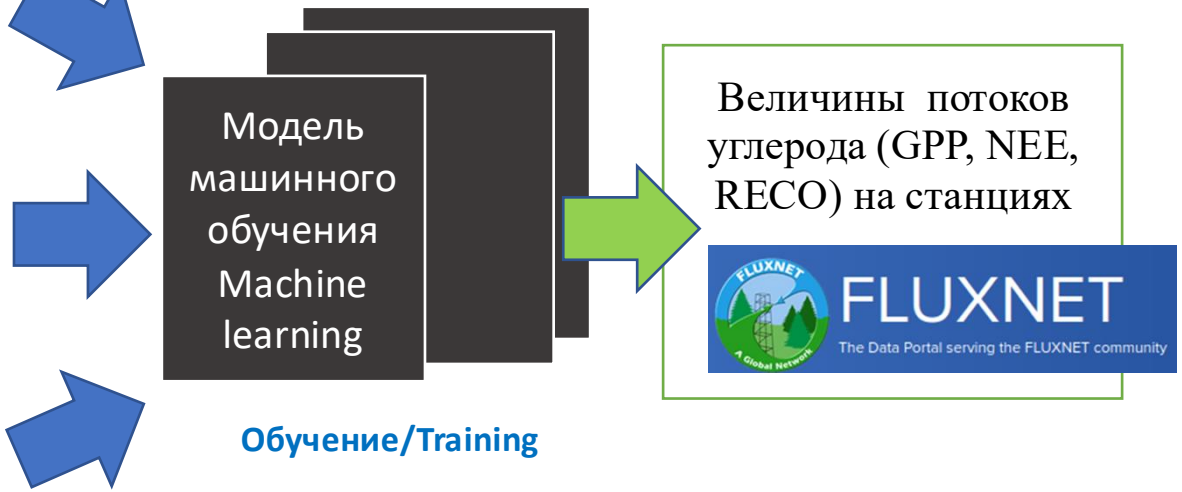
Модель машинного обучения NorthFlux

Глобальные спектральные данные спутникового сенсора MODIS (продукт MOD09 CMG) с временным разрешением 1 сутки и пространственным разрешением 0.05° x 0.05°. Продукт разработан NASA для климатических приложений

Глобальные метеоданные ретроспективного анализа Европейского бюро среднесрочных прогнозов ERA5, с пространственным разрешением 0.25° x 0.25°, в том числе кумулятивные данные по температуре и осадкам.

Глобальные спутниковые данные по классификации растительности подстилающей поверхности, с пространственным разрешением 0.05° x 0.05° - продукт MCD12C1 v061. Продукт разработан NASA в рамках Международной геосферно-биосферной программы

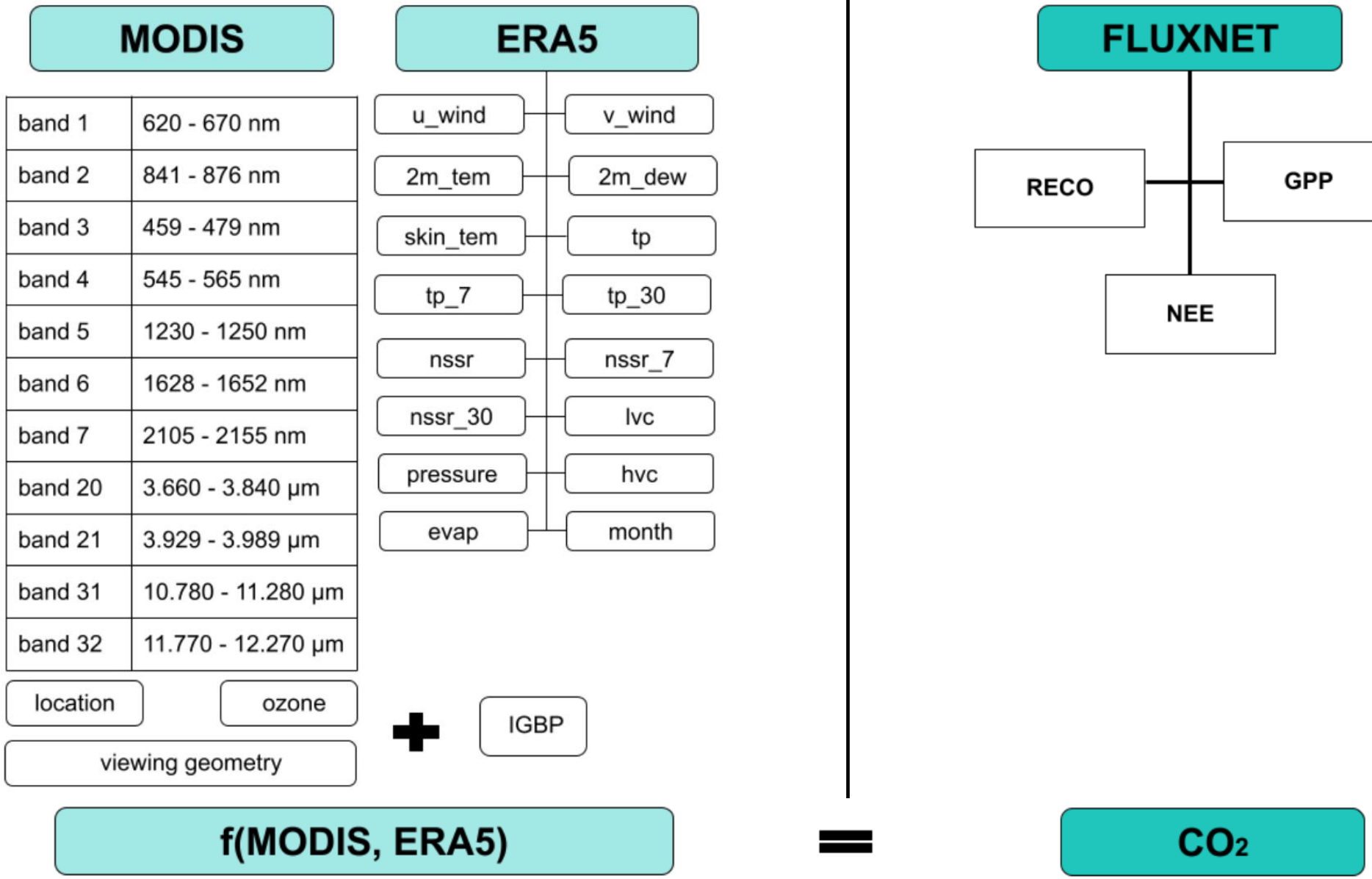
Для тренировки ансамблевой модели машинного обучения NorthFlux использовались накопленные данные на 175 станциях международной сети FLUXNET, выполнявших измерения NEE в Северном полушарии методом турбулентных пульсаций (Eddy Covariance)

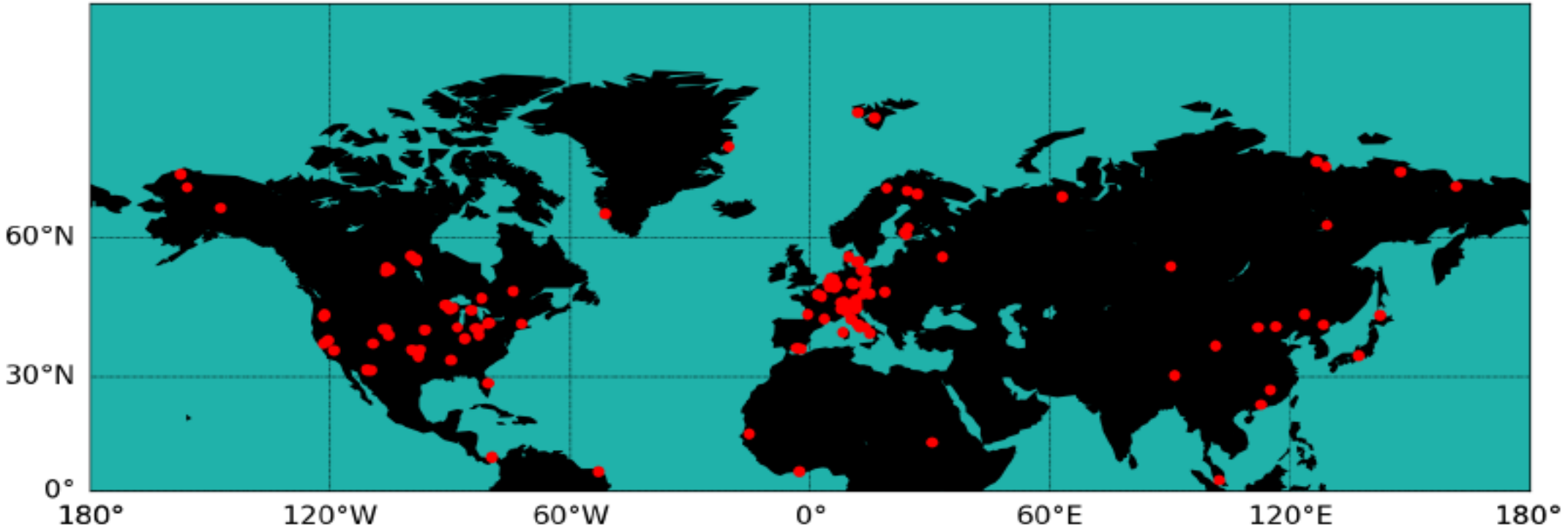


GPP – (Gross Primary Production) – входящий поток углерода (фотосинтез).
RECO – (Ecosystem Respiration / Gross Respiration) – исходящий поток углерода (дыхание + разложение).
NEE – (Net Ecosystem Exchange) – нетто-экосистемный обмен (чистый обмен CO_2 между экосистемой и атмосферой).

Структура набора данных для обучения и тестирования модели.
Входные данные — слева, целевые значения – справа.

Уральский федеральный университет



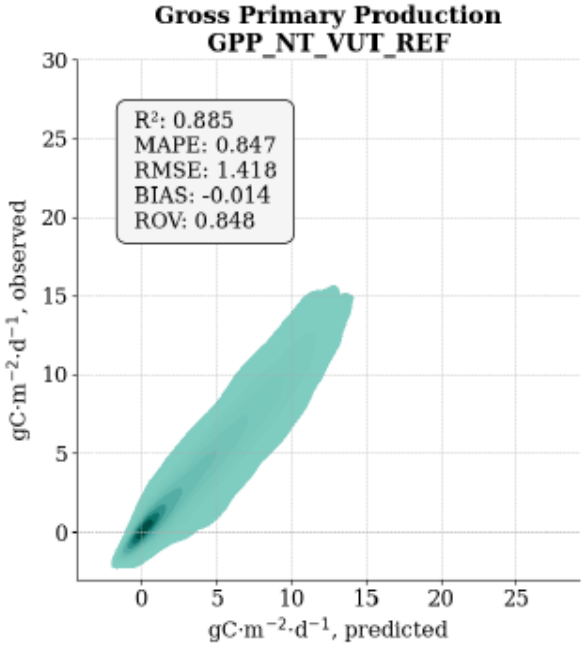


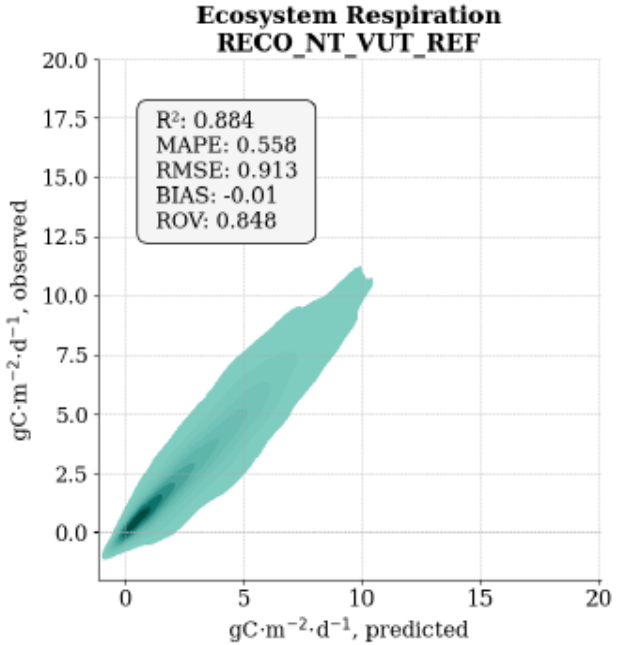
Для обучения и тестирования модели NorthFlux использовался набор данных измерений потоков углерода методом турбулентных пульсаций (Eddy Covariance) с 175 станций международной сети FLUXNET в Северном полушарии за период 2000-2014 г.г.

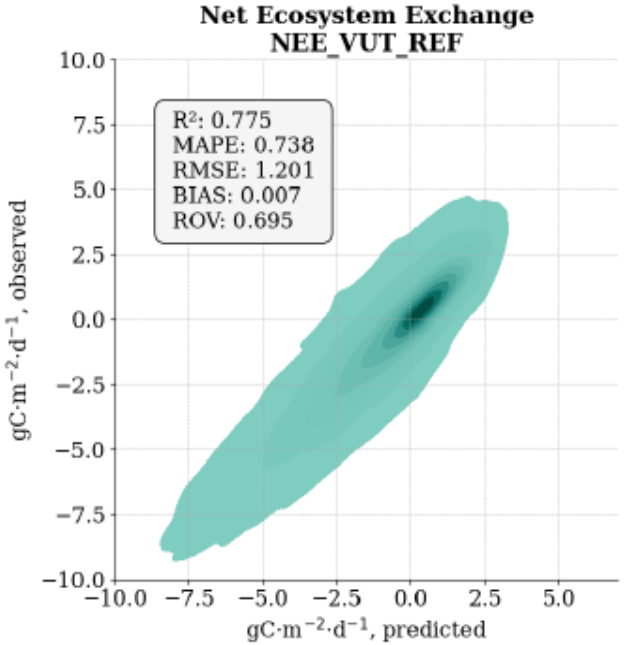
Всего был сформирован набор из более 278 тысяч соответствующих пар входных и выходных данных, из которых 70% использовались для обучения модели, а 30% для ее тестирования.

Результаты тестирования модели NorthFlux



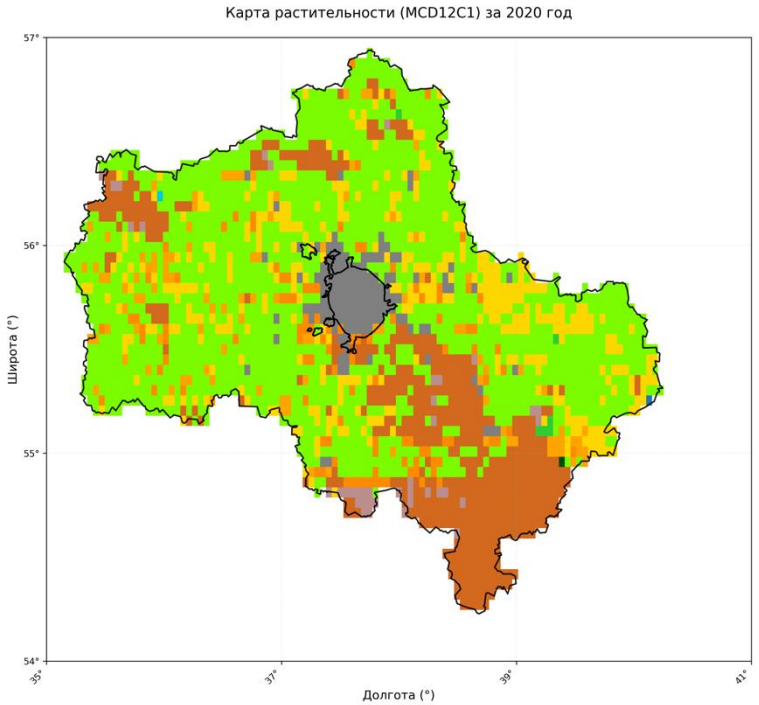


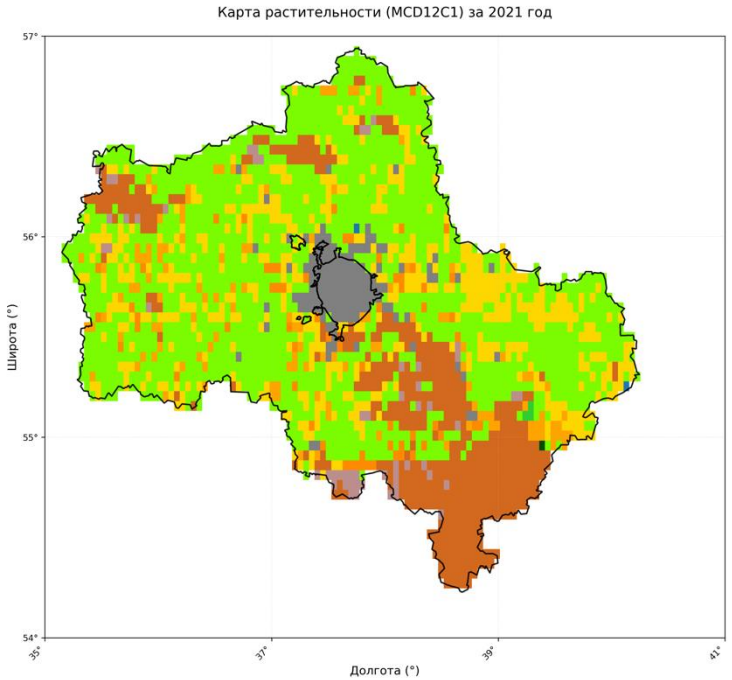


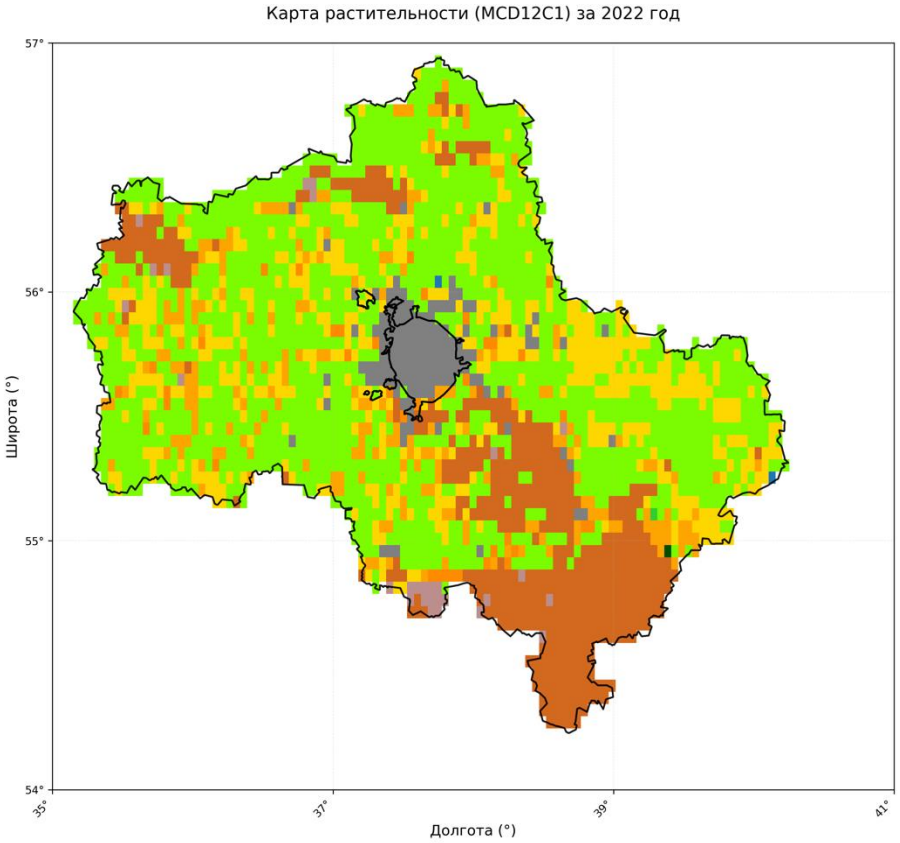


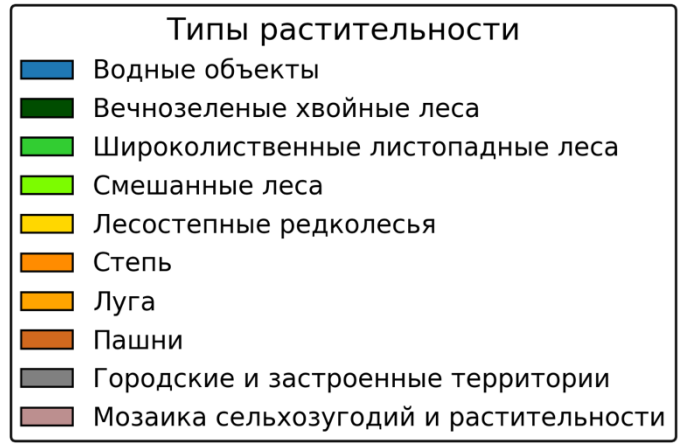
Тестирование модели выполнялась на данных сети FLUXNET, не участвовавших в обучении модели (30% данных). Результаты тестирования приведены на диаграммах рассеяния модельных и измеренных данных.

Проведенное сравнение с данными натурных измерений на участке «Урал-Карбон» на 32м вышке в Коуровке за вегетационный период 2024 года показывает, что различие данных измерений и результатов моделирования (модель –104,92, измерения –93,66 гС/м²) составляет около 11%, что для экосистемного уровня является приемлемым и позволяет использовать модель для оценки нетто-поглощения атмосферного CO_2 лесными экосистемами.



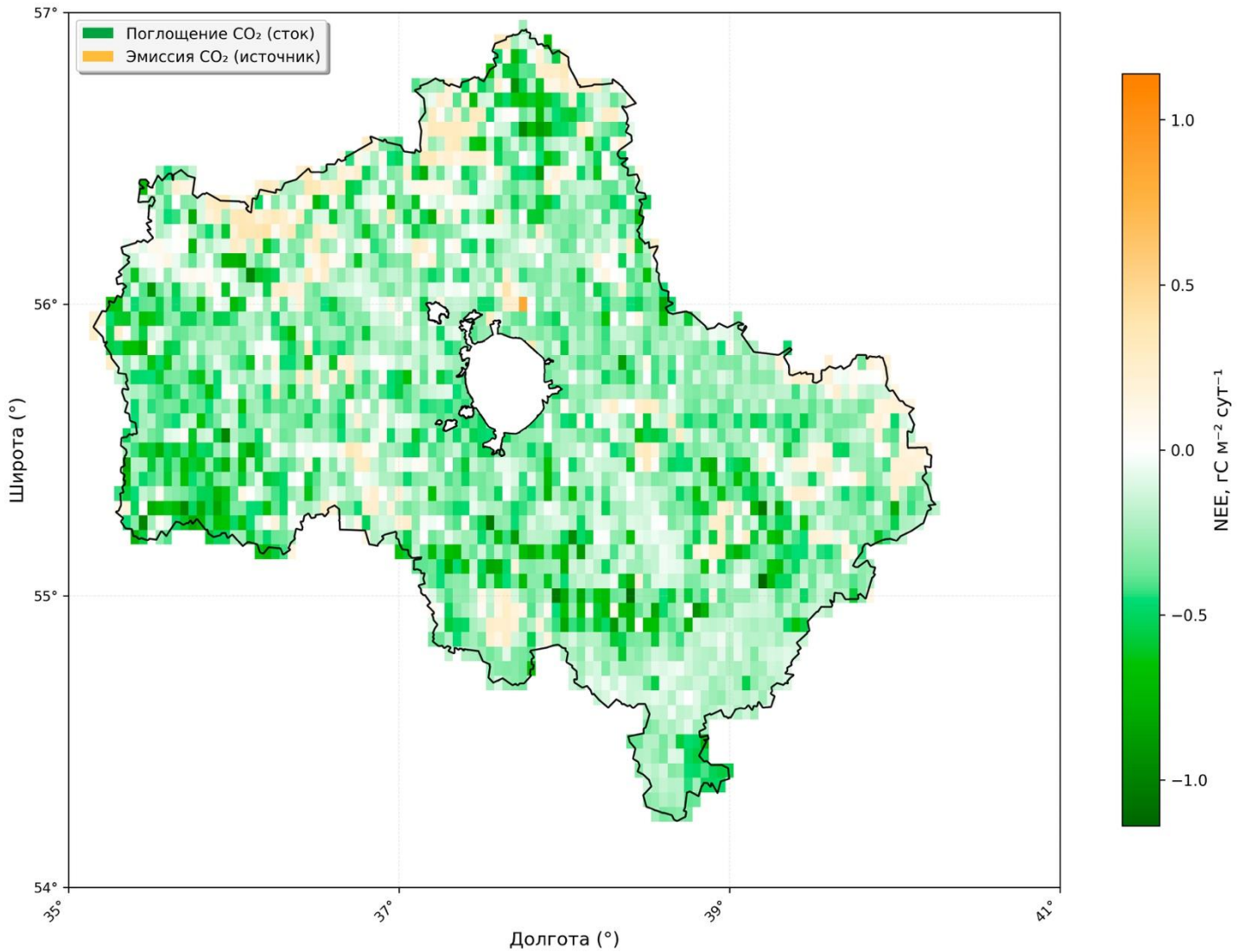






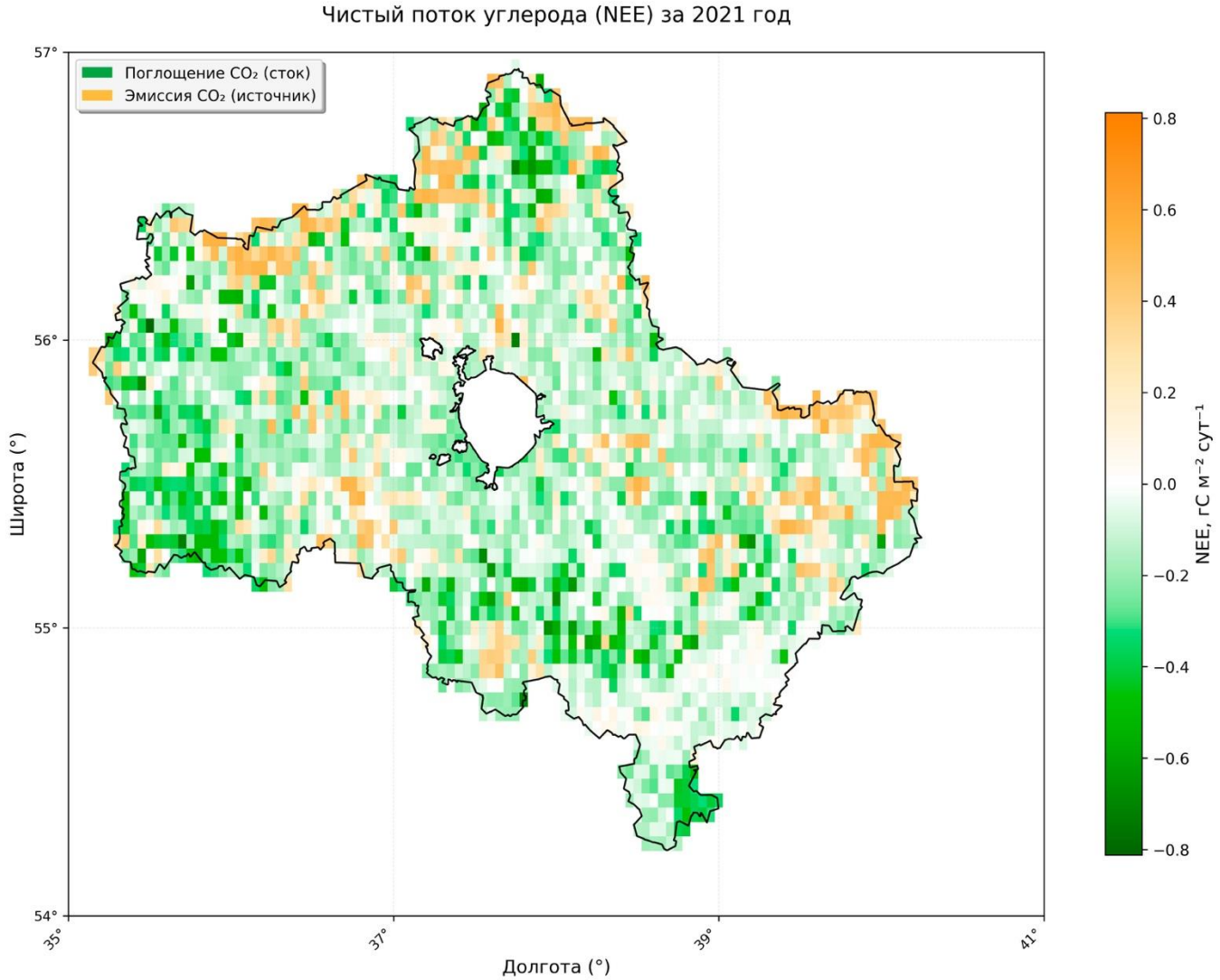
Карты классификации растительности Московской области.
Продукт MCD12C1 (MODIS) Пространственное разрешение 0.05° x 0.05°
Выделенный участок серого цвета в центре рисунка – г. Москва

Результаты моделирования



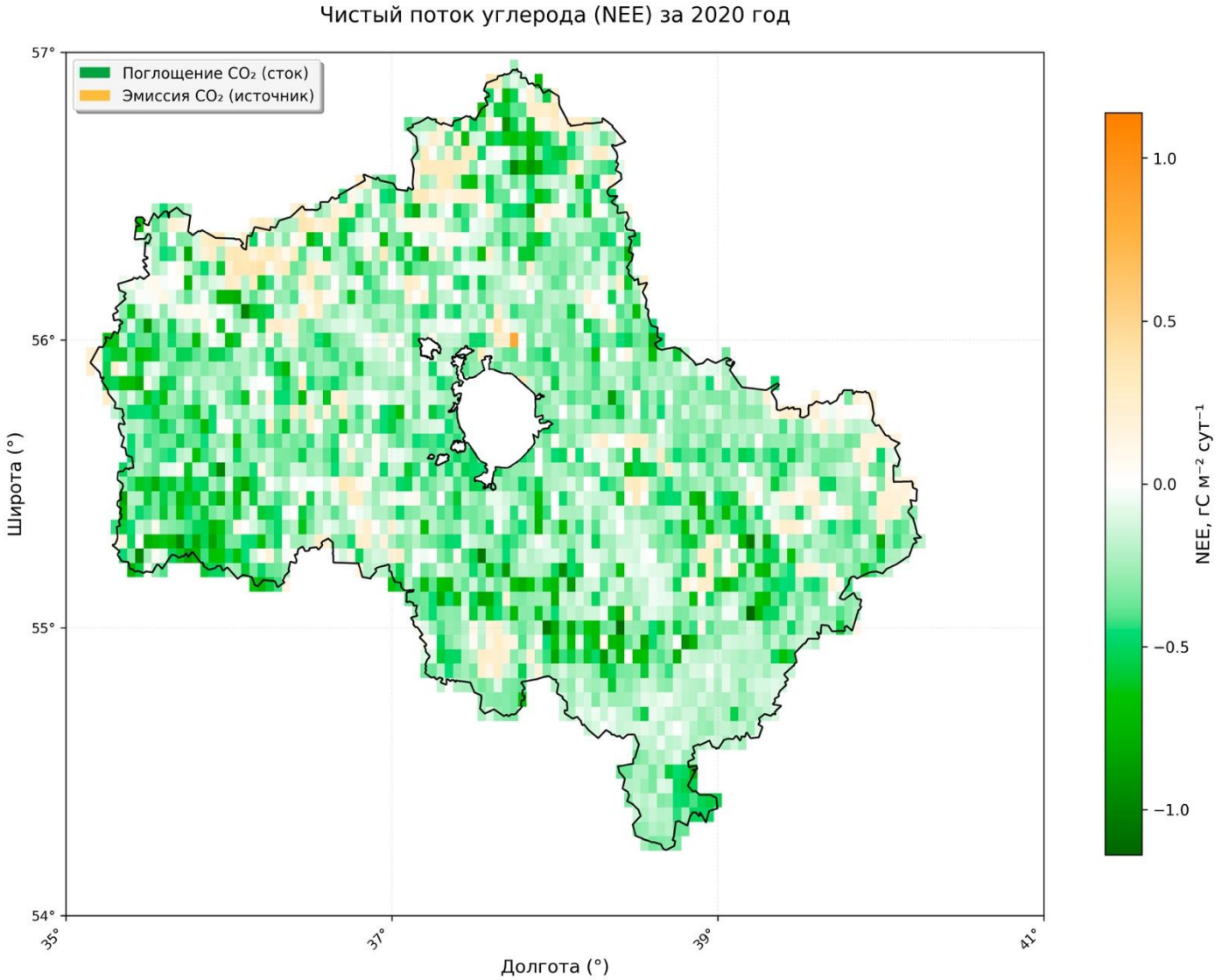
Карта среднесуточного нетто-поглощения атмосферного CO_2 за 2020 год экосистемами Московской области. Пространственное разрешение 0.05° x 0.05°. Выделенный участок белого цвета в центре рисунка – г. Москва.

Результаты моделирования



Карта среднесуточного нетто-поглощения атмосферного CO_2 за 2021 год экосистемами Московской области. Пространственное разрешение 0.05° x 0.05°. Выделенный участок белого цвета в центре рисунка – г. Москва.

Результаты моделирования



Карта среднесуточного нетто-поглощения атмосферного CO_2 за 2022 год экосистемами Московской области. Пространственное разрешение 0.05° x 0.05°. Выделенный участок белого цвета в центре рисунка – г. Москва.

Результаты моделирования

Таблица распределения баланса углерода по классам растительности в Московской области за 2020 г.

Класс	Площадь, км²	Среднесуточный NEE, гС/м²/сут	Чистый баланс, Мт С	Эмиссия, Мт С	Поглощение, Мт С
Вечнозеленые хвойные леса	17.752	-0.343	-0.002	0	-0.002
Водно-болотные угодья	17.173	-0.590	-0.004	0	-0.004
Широколиственные листопадные леса	105.199	-0.519	-0.019	0	-0.019
Мозаика сельхозугодий и растительности	589.474	-0.303	-0.065	0.001	-0.066
Луга	1902.113	-0.297	-0.207	0.012	-0.218
Степь	1881.807	-0.305	-0.209	0.013	-0.223
Лесостепные редколесья	6075.599	-0.277	-0.617	0.020	-0.637
Пашни	9093.332	-0.241	-0.803	0.025	-0.828
Смешанные леса	25498.39	-0.222	-2.073	0.334	-2.407
ИТОГО ПО ТЕРРИТОРИИ	45180.84	-0.244	-4.252	0.410	-4.662

Результаты моделирования

Таблица распределения баланса углерода по классам растительности в Московской облсти за 2021г.

Класс	Площадь, км²	Среднесуточный NEE, гС/м²/сут	Чистый баланс, Мт С	Эмиссия, Мт С	Поглощение, Мт С
Вечнозеленые хвойные леса	17.752	-0.118	-0.001	0	-0.001
Широколиственные листопадные леса	53.034	-0.240	-0.005	0.001	-0.005
Степь	1103.575	-0.118	-0.048	0.015	-0.062
Мозаика сельхозугодий и растительности	862.237	-0.178	-0.056	0.001	-0.057
Луга	2219.762	-0.120	-0.097	0.034	-0.131
Пашни	8403.801	-0.101	-0.309	0.057	-0.367
Смешанные леса	24130.96	-0.041	-0.355	0.779	-1.133
Лесостепные редколесья	8442.215	-0.118	-0.362	0.104	-0.466
ИТОГО ПО ТЕРРИТОРИИ	45233.34	-0.077	-1.337	1.009	-2.346

Результаты моделирования

Таблица распределения баланса углерода по классам растительности Московской облсти за 2022г.

Класс	Площадь, км²	Среднесуточный NEE, гС/м²/сут	Чистый баланс, Мт С	Эмиссия, Мт С	Поглощение, Мт С
Вечнозеленые хвойные леса	17.751	-0.185	-0.001	0	-0.001
Широколиственные листопадные леса	17.685	-0.559	-0.004	0	-0.004
Мозаика сельхозугодий и растительности	418.431	-0.292	-0.045	0.003	-0.045
Степь	648.113	-0.2699	-0.064	0.002	-0.066
Луга	3911.881	-0.254	-0.363	0.014	-0.377
Пашни	8390.855	-0.238	-0.728	0.012	-0.739
Лесостепные редколесья	8343.314	-0.247	-0.752	0.028	-0.779
Смешанные леса	23484.58	-0.199	-1.703	0.274	-1.979
ИТОГО ПО ТЕРРИТОРИИ	45232.61	-0.223	-3.882	0.335	-4.217

Уральский федеральный университет

Результаты оценки интегрального нетто-поглощения CO_2 (NEE) из атмосферы за год экосистемами Московской области.

Данные приведены в мегатоннах углерода (Мт С)

Год	Чистый баланс (Мт С)	Эмиссия (Мт С)	Поглощение (Мт С)	Среднесуточный NEE (гС/м²/сут)
2020	-4.252	0.410	-4.662	-0.244
2021	-1.337	1.009	-2.346	-0.077
2022	-3.882	0.335	-4.217	-0.223

Обсуждение результатов

Из приведенных данных следует, что в экосистемах Московской области углеродный баланс стабильно смещен в сторону поглощения и варьируется от -1.337 МтС до -4.252 МтС нетто-поглощенного углерода или 4.899 $МтCO_2$ – 15.579 $МтCO_2$ нетто-поглощенного из атмосферы углекислого газа. Что в пересчете на единицу площади составляет от 21.08 $тС/км^2$ до 89.26 $тС/км^2$ нетто-поглощенного углерода или 102.88 $тCO_2/км^2$ – 327.17 $тCO_2/км^2$ нетто-поглощенного углекислого газа.

Эти оценки показывают, что экосистемы Московской области выполняют функцию стока атмосферного CO_2 и демонстрируют секвестрационный потенциал (объемы поглощения CO_2 на единицу площади) за 2020 и 2022 годы выше, чем в Томской области (от 231.97 до 268.13 $тCO_2/км^2$), в Свердловской (от 30,74 до 42,06 $тCO_2/км^2$) и Челябинской области (от 112,56 до 239,22 $тCO_2/км^2$), а также Ханты-Мансийского автономного округа (от 210.86 до 251.02 $тCO_2/км^2$), но меньше, чем в Тюменской (без АО) и Курганской областях, которые демонстрируют секвестрационный потенциал от 294,51 до 341,19 $тCO_2/км^2$ и от 319,32 до 401,32 $тCO_2/км^2$, соответственно [4]. А за 2021 год выше только по сравнению со Свердловской областью.

4. Сухих Г.А., Розанов А.П., Грибанов К.Г., Захаров В.И. «Оценка природных потоков CO_2 на территориях субъектов Уральского федерального округа по спутниковым данным», в книге: Материалы 23-й Международной конференции "Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса". Москва, 2025. С. 201.

Выводы

1. Природные сообщества Московской области в целом выполняют функцию стока атмосферного углекислого газа. При этом наблюдается существенная пространственная неоднородность: вклад различных классов растительности в углеродный баланс области заметно различается.
2. Ключевым поглотителем в Московской области являются смешанные леса.
3. Ключевым эмитентом так же являются смешанные леса, но поглощение CO_2 в них существенно превышает выделение.

Исследование выполнено при поддержке госзадания Минобрнауки РФ, проект №FEUZ-2024-0011.

Уральский федеральный университет

Спасибо за внимание!

Контакты:

Сухих Г.А. augustmilosskiy@gmail.com

Розанов А.П. rozan012@umn.edu

Грибанов К.Г. kgribanov@remotesensing.ru

Захаров В.И. v.zakharov@remotesensing.ru