Организация системы мониторинга углеродсодержащих парниковых газов и оценка углеродного бюджета карбонового полигона Свердловской области «Урал-Карбон» (отчет о результатах работы в 2021-2022 гг. и планы на 2023-2025 гг.)

Organization of a monitoring system for carbon greenhouse gases and assessing the carbon budget of taiga communities at the Ural-Carbon

Валдайских Виктор Владимирович
директор ботанического сада УрФУ,
руководитель проекта «Урал-Карбон»
8-912-277-07-22
valdayskikh.victor@urfu.ru

Victor Valdayskikh
The Director of Botanical garden UrFU
Head of Ural-Carbon project
e-mail: valdayskikh.victor@urfu.ru
mob.: +79122770722

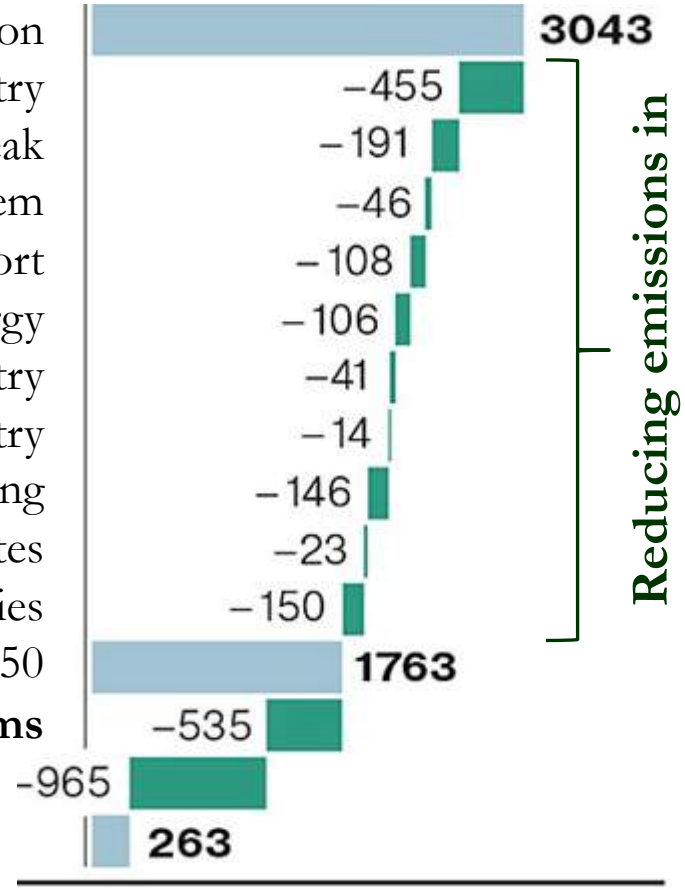
Features of the low-carbon development strategy of the Russian Federation

Ural-Carbon

Obligations to reduce greenhouse gas emissions in accordance with Paris 2015

To keep global warming at no more than 1.5°C, it is necessary to reduce greenhouse gas emissions by 45% by 2030 and reach zero by 2050. More than 70 countries, including the largest emitters of greenhouse gases – China, the United States and the European Union have set a Net Zero Emissions goal of zero GHG emissions. This corresponds to about 76% of all global emissions.

Strategy of socio-economic development of the Russian Federation



Great importance in this strategy was devoted to the increase the absorption capacity of natural ecosystems, primarily forests and agricultural lands. It is necessary to recalculate the natural absorption of ecosystems by precise methods and work to increase their absorption capacity

It will not be possible to achieve carbon zero in the Russian Federation only by reducing emissions

Carbon measurement test areas of Russian Federation

Ural-Carbon

The project will solve several tasks:

1. Detailed monitoring of the fluxes of climate active gases in various ecosystems to obtain reliable integral estimates of the fluxes for certain types of landscapes across Russia.
2. An assessment of the potential of various landscapes for greenhouse gas absorption.
3. Development of greenhouse gas sequestration technologies tailored to particular types of landscapes.

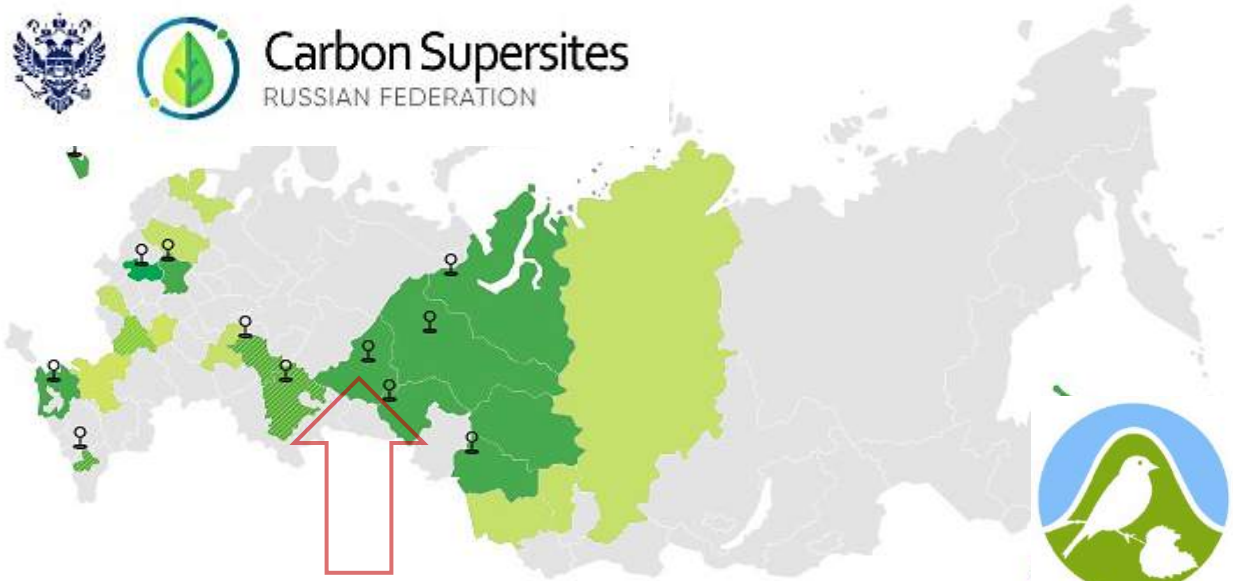
"A national system involving the potential of our science is already being built. We create here a network of so-called carbon polygons, where the control of emission and absorption of carbon dioxide is being worked out gas in real time, the state of natural systems, the quality of water resources are assessed and other parameters."

Vladimir Putin, SPIEF'21

Carbon measurement supersites are one or more areas of the earth's surface with a topography, vegetation and soil cover representative for a given territory, created to implement measures aimed at developing scientific, human and infrastructural potentials in the development and testing of technologies for monitoring the balance of climatic active gases of natural ecosystems.

Ural-Carbon

Carbon supersite of Sverdlovsk region Ural-Carbon project



Carbon supersite of Sverdlovsk region –
“Ural-Carbon project”
It is located in the taiga of the Middle Urals

The consortium of the Ural-Carbon project

Operator:

Ural Federal University
named after the first President of Russia B.N.Yeltsin

Partners:

Institute of Plant and Animal Ecology

Ural State Forestry Engineering University

Institute of Industrial Ecology

Jral State Agrarian Jniversity

Botanical garden

Institute of Mathematics and Mechanics

Ural State Mining University

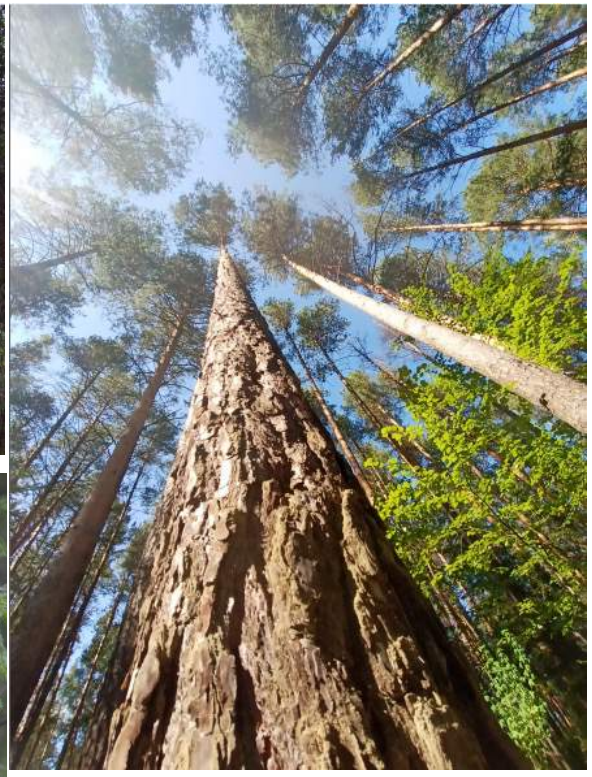
Carbon supersite of Sverdlovsk region Ural-Carbon project

Ural-Carbon

Mast equipment measuring greenhouse gas fluxes using the eddy covariance method

Ural-Carbon unites the efforts of eight leading institutes of the Academy of Sciences and universities of Yekaterinburg. The test site contains the latest high-tech equipment that allows measuring the content in the atmosphere and fluxes of greenhouse gases, as well as in natural carbon pools.
The purpose of the polygon is to quantitatively establish the values of runoff and carbon emissions of greenhouse gases for the Sverdlovsk region, remote monitoring of the balance of greenhouse gases, and the development of technological solutions for the sequestration of atmospheric carbon.

A carbon sequestration site is a section of natural landscapes where methods for accounting for emissions and deposition of greenhouse gases are being developed.



Coniferous forests of the Urals accumulate atmospheric carbon and ensure its long-term storage in wood

Greenhouse gas monitoring system of Ural-Carbon project

Ural-Carbon

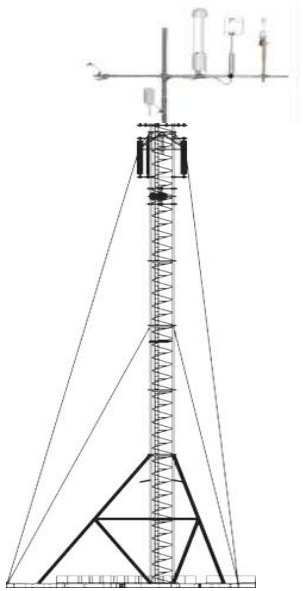
At the atmosphere of supersite Ural Carbon the greenhouse gas monitoring system includes several altitude levels

~800 km

remote sensing:
validation of **satellite sounding data**
GOSAT/GOSAT-2, OCO-2, MODIS
Aura, Aqua (NASA), Kanopus-B, Resurs

~80 km

entire atmospheric column:
high-resolution infrared Fourier spectrometer **Bruker IFS-125M**



32 m

surface level above the tree crowns:
Eddy Covariance system **Li-COR 7200RS**

3 and 10 m

surface level:
automated laser analyzer **Picarro G2401**

Greenhouse gas monitoring system of Ural-Carbon project

Ural-Carbon

At the atmosphere over supersite Ural Carbon the greenhouse gas monitoring system includes several altitude levels

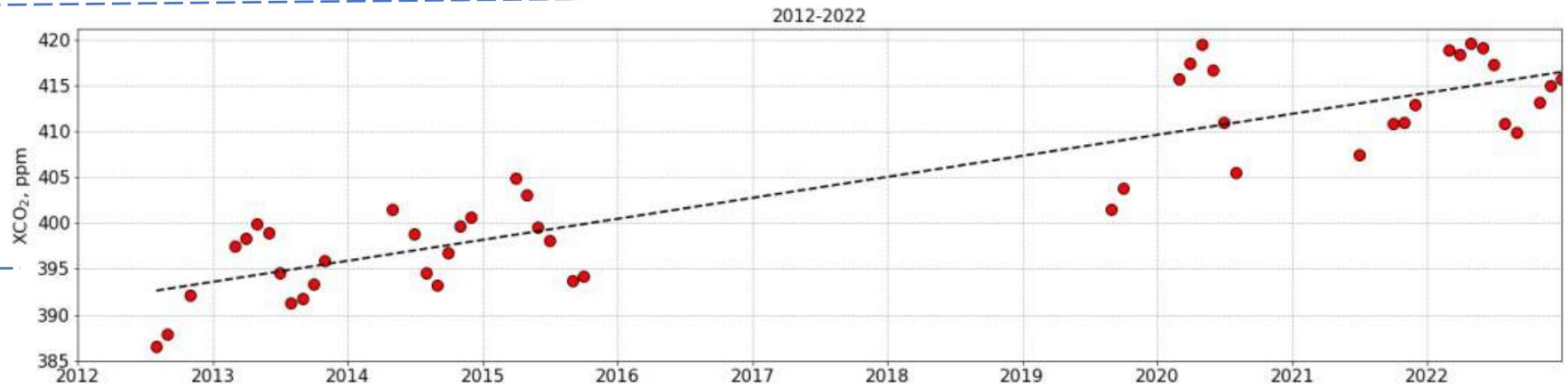
~800 km

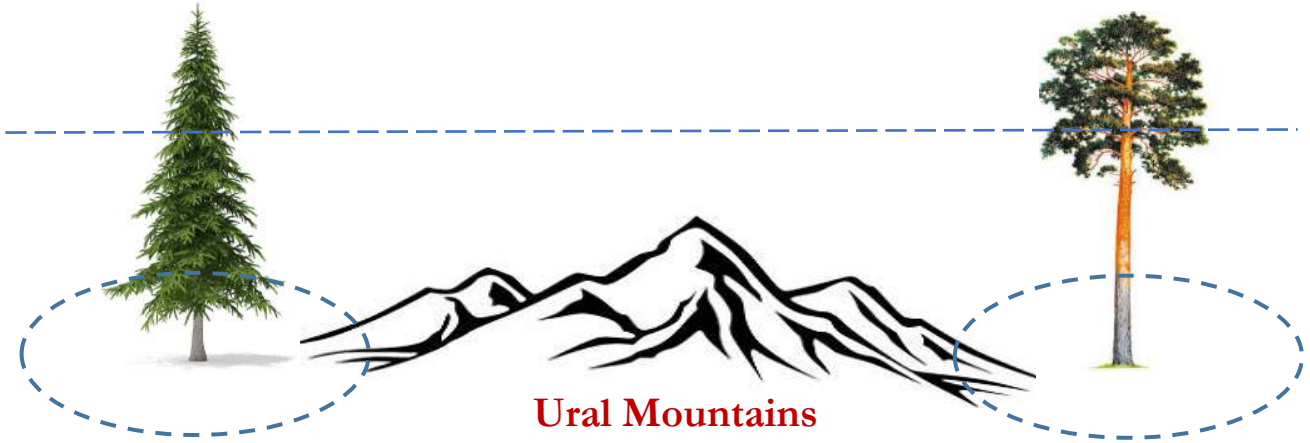
~80 km

32 m

3 and 10 m

The concentration of CO_2 in the atmosphere of Ural increases by an average of 3 ppm per year



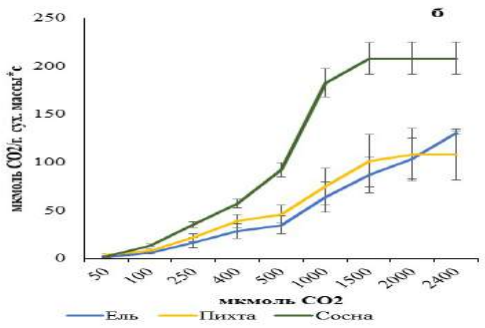


Ural-Carbon

Greenhouse gas monitoring system of Ural-Carbon project

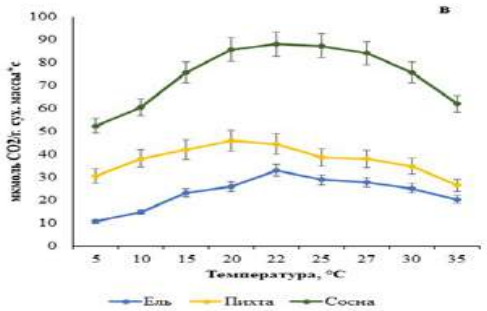
We check the carbon budget of the taiga with other ground-based methods

Iintensity of photosynthesis of edificatory plants:
portable gas analyzers
Li-Cor 6400 XT

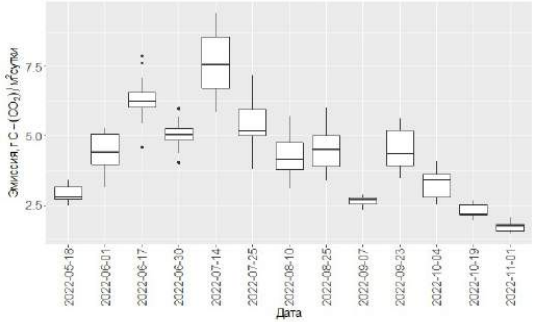


and

Waltz-3000 7200RS



the soil respiration:
portable gas analyzer
Li-Cor 7810SC

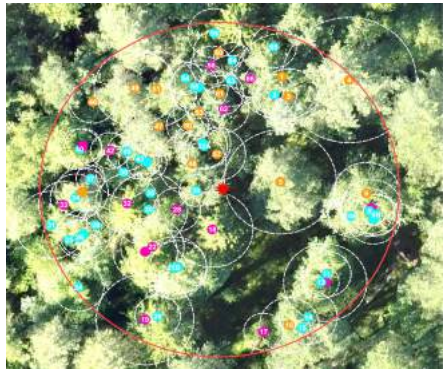


Ural-Carbon

Greenhouse gas monitoring system of Ural-Carbon project

We check the carbon budget of the taiga with other ground-based methods

remote methods:
copter **DJI Matrice 300 RTK** with lidar DJI Zenmuse L1 and a multispectral camera RedEdge-MX + SkyPort

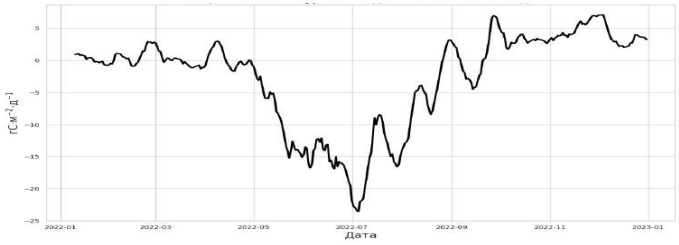


the content of organic matter in soils :
carbon and nitrogen analyzer **Multi N/C 2100**

Net ecosystem carbon budget of Ural-Carbon project

According to various estimates, the forests of Russia accumulate 600-850 millions tons of carbon, which is equivalent to the sequestration of 2,200-3,100 million tons-eq. CO_2. The total anthropogenic greenhouse gas emissions in the Russian Federation are estimated at about 2,000 million tons-eq. CO_2.

The boreal forest of supersite Ural Carbon sequesters about 3,5 tons of carbon dioxide per hectare per year or 95,2 g C m^{-2} $year^{-1}$



Net ecosystem carbon budget of Russia's forests carbon (g C m^{-2} $year^{-1}$)

Source: Kurichev, 2023

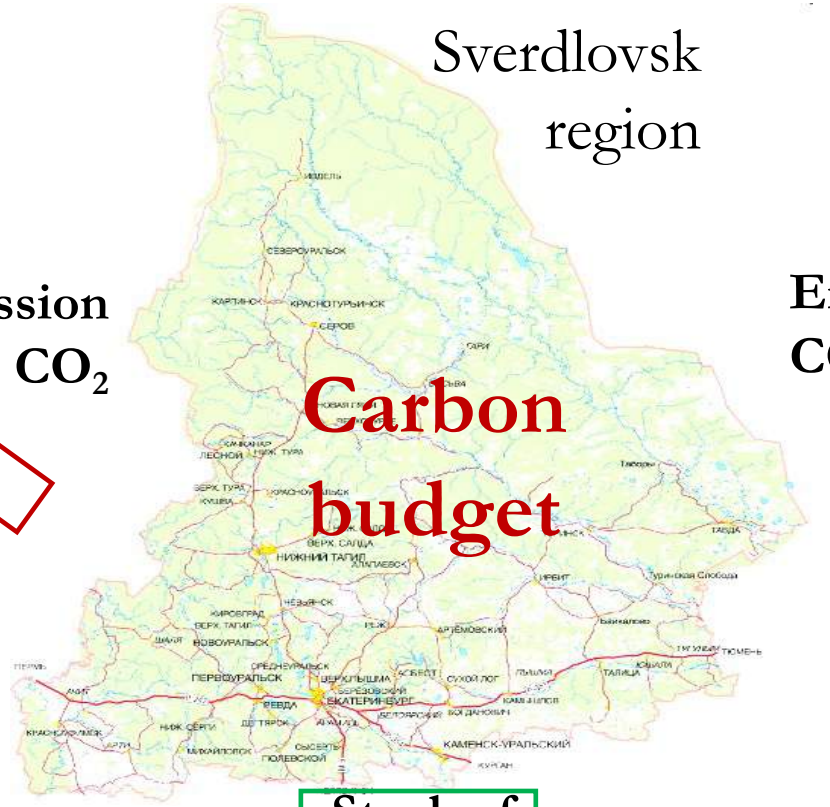
Total schema of carbon budget of Ural taiga

Ural-Carbon

obligatory system of accounting for greenhouse gas emissions has been introduced in Russia since 2023

Emission CO_2

Sverdlovsk region



Carbon budget

Emission CO_2

the number of forest fires is increasing due to climate change

Stock of CO_2

factories will be able to develope of atmospheric carbon sequestration technologies and receive carbon units on the carbon exchange

Stock of CO_2

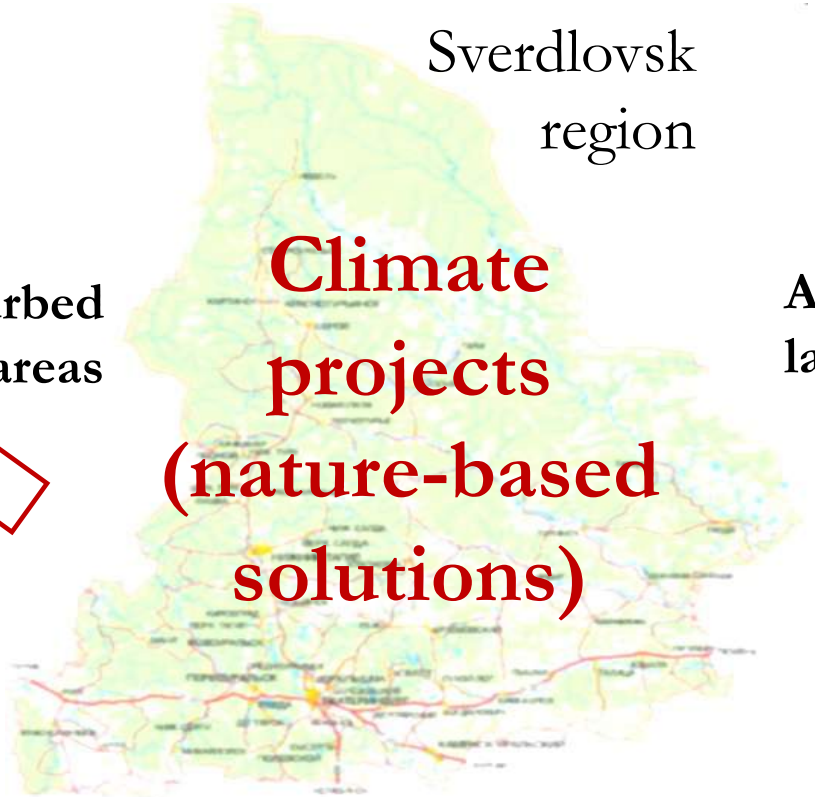
Our final task is to calculate the carbon budget of the entire region

Directions of development of climate projects of Ural-Carbon

Ural-Carbon

Disturbed areas

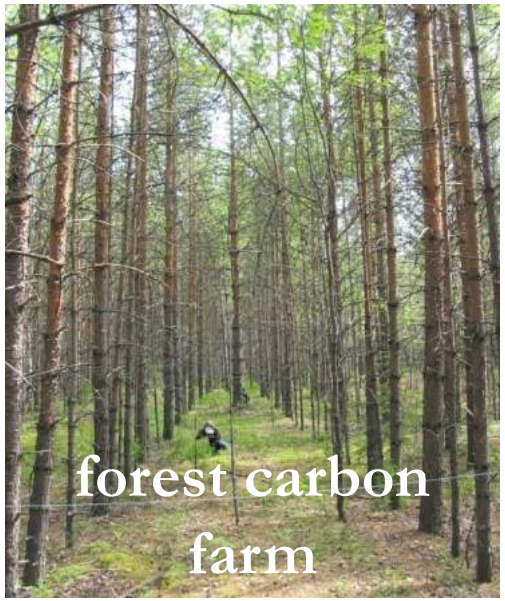
Accelerated stock of CO_2



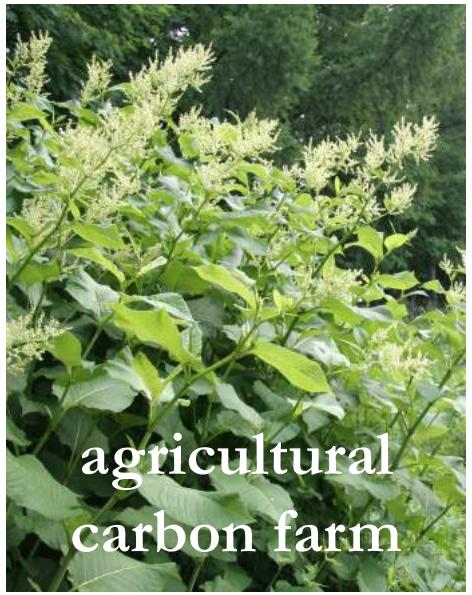
Climate projects (nature-based solutions)

Agricultural land

Accelerated stock of CO_2



The concept of a "climate project" has appeared and is legally enshrined in Russia. The climate project may include additional measures to reduce direct greenhouse gas emissions or increasing energy efficiency (technology-based solutions). But sequestration technologies may be related with an increase in the absorption capacity of ecosystems (nature-based solutions)

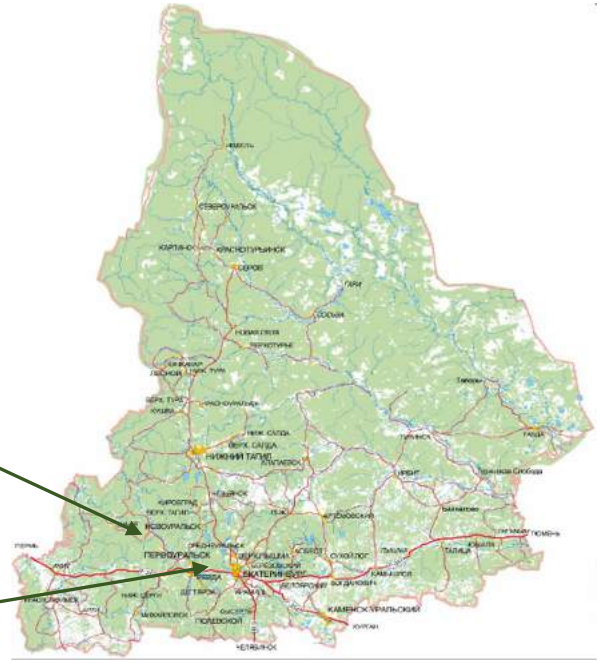


«Урал-Карбон»

Участки карбонового полигона Свердловской области

«Урал-Карбон»

Карбоновый полигон Свердловской области состоит из двух основных участков. Оба участка карбонового полигона представлены относительно малоизмененными таежными лесами



<u>Участок 1.</u> Коуровская астрономическая обсерватория (Уральский федеральный университет, 134 га)
Экорегион – 58 (южная темнохвойная тайга)

<u>Участок 2.</u> Уральский учебно-опытный лесхоз (Уральский государственный лесотехнический университет, 457 га)
Экорегион – 36 (южная тайга, горная тайга, болота)

«Урал-Карбон»

Инфраструктура полигона и выполняемые задачи

Наземные прямые измерения потоков:

а) **камерные газоанализаторы**:
- Li-Cor 8100A
- Li-Cor 7810SC

б) **системы измерения фотосинтеза, дыхания и транспирации растений:**
- Li-Cor 6400 XT (2 шт.)
- Waltz-3000

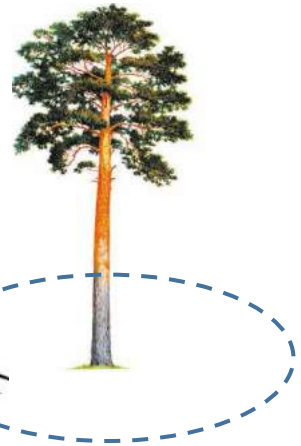
Метеооборудование:

- **метеостанция** профессиональная универсальная **«АИК-Инфомет А70»**
- автоматизированная **метеостанция Gill Instruments**

Инвентаризация запасов древесины, гумуса почв, биомассы, мортмассы:

- **анализатор углерода и азота Multi N/C 2100** (AnalytikJena, Германия) (2 шт.) для измерения углерода в твердых образцах почв и растительности
- **анализатор азота по Кьельдалю, UDK 139 Semi-Automatic Kjeldahl** (VELP Scientifica, Italy) (2 шт.)

- **квадрокоптер DJI Matrice 300 RTK** (2 комплекта) с системой лазерного сканирования DJI Zenmuse L1, мультиспектральной камерой RedEdge-MX + SkyPort и ПО DJI Terra Pro **- квадрокоптер DJI Mavic air-2**
- квадрокоптер DJI Mini-2
- система высокоточного трехмерного сканирования Л-СКАН на базе многоканального лидара Velodyne VLP-16, система включает в себя интегрированную с ГНСС инерциальную навигационную систему Applanix APX-18 с приемом сигналов GPS/ГЛОНАСС/Baidou/Galileo



Учебно-лабораторный корпус «Урал-Карбон (УрФУ)

Уральский хребет

Участок 1 (Коуровка)

Участок 2 (Северка)

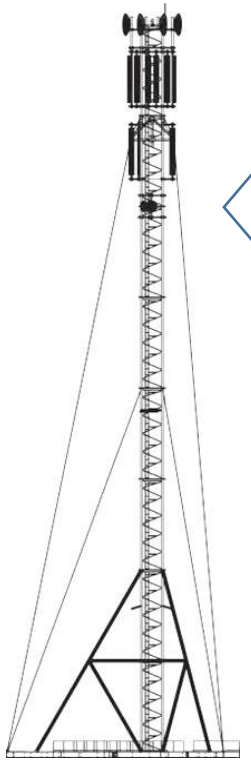
Контора учебно-опытного лесхоза (УГЛТУ)

«Урал-Карбон»

Инфраструктура полигона и выполняемые задачи

Подспутниковые измерения содержания ПГ:

- **уральская атмосферная Фурье-станция (УАФС)**, включающая инфракрасный **Фурье-спектрометр Bruker IFS-125M** высокого разрешения
- **стационарный комплект Eddy Covariance** на основе газоанализатора CO_2/H_2O закрытого типа Li-7200RS и ультразвукового анемометра uSonic-2 Cage MP, с набором аксессуаров и монтажных элементов на мачте высотой 32 м на территории Коуровской обсерватории
- **мобильная станция Eddy Covriance** на основе газоанализатора CO_2/H_2O закрытого типа LI-7200RS, ультразвукового анемометра uSonic-3 Cage MP, газоанализатора CH_4 Li-7700, укомплектованная еще набором датчиков Biomet (датчик температуры и влажности, четырехканальный радиометр, датчик фотосинтетически активной радиации, датчики в почву для определения потоков тепла, температуры и влажности)
- **лазерный анализатор углеродсодержащих парниковых газов Picarro G2401**



мачта 32 метра (установлена в Коуровской обсерватории)

мачта 5 метров (будет установлена в агро-ландшафтах)

Дистанционное зондирование с использованием спутниковых данных:

- GOSAT/GOSAT-2 и OCO-2
- данные мультиспектральных сенсоров космического базирования типа MODIS Aura, Aqua (NASA), Канопус-В, Ресурс (Роскосмос)

Моделирование потоков ПГ:

- суперкомпьютерный центр «УРАН», 7 Тбайт оперативной памяти. Пиковая производительность СК 260 TFlops. Система хранения имеет объем 144 Тбайт полной емкости.

- **рабочая станция (суперкомпьютер) Freedom** Dual AMD Epyc 64 (core) – 128 ядер (256 потоков): оперативная память 1 терабайт (16 модулей по 64 гигабайта), общий объем памяти 106 терабайт (из них 10 терабайт быстрой SSD для взаимодействия с ОЗУ) с возможностью наращивания объема (установки HDD)

«Урал-Карбон»

Состав сотрудников карбонового полигона и их роль в проекте

Уральский государственный лесотехнический университет УГЛТУ

Группа 3. Количественная оценка фитомассы лесных насаждений и запасов углерода

Ботанический сад УрО РАН

Группа 7б. Интродукция, селекция и биоинженерия растений, перспективных для депонирования атмосферного углерода

Уральский государственный сельскохозяйственный университет

Группа 7в. Интродукция, селекция и биоинженерия растений, перспективных для депонирования атмосферного углерода

Уральский федеральный университет

Группа 1. Дистанционное зондирование атмосферы для определения содержания парниковых газов

Группа 4. Полевое измерение фотосинтетической активности и дыхания растений в разных типах ландшафтов карбонового полигона

Группа 6. Оценка существующих запасов углерода в растительности, почве, мортмассе участков карбонового полигона

Группа 7а. Интродукция, селекция и биоинженерия растений, перспективных для депонирования атмосферного углерода

Институт промышленной экологии УрО РАН

Группа 2. Непрерывные инструментальные измерения метеопараметров, концентраций парниковых газов in situ на базе газоанализатора Picarro G2401

ИЭРиЖ Институт экологии растений и животных

Группа 5. Полевое измерение эмиссии CO_2 из почвы экосистем карбонового полигона при различных условиях внешней среды

Институт математики и механики им. Н.Н. Красовского

Группа 1. Дистанционное зондирование атмосферы для определения содержания парниковых газов

Уральский государственный горный университет

Группа 8. Инструментальное измерение и расчет выбросов ПГ предприятий

«Урал-Карбон»

Основные результаты мониторинга

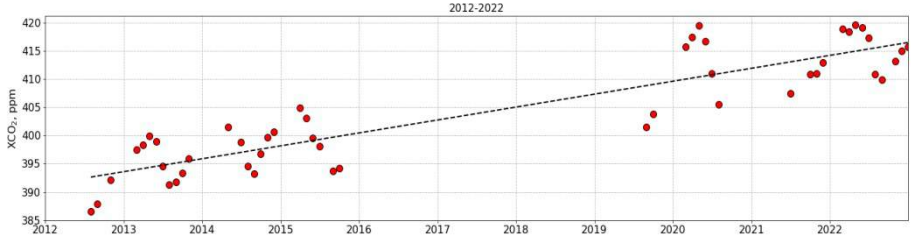
Группа 1. Дистанционное зондирование атмосферы

Базовое учреждение: Лаборатория физики климата и окружающей среды ИЕНиМ УрФУ
Руководитель – д.ф.-м.н. Захаров В.И.

ИК Фурье-спектрометр Bruker IFS-125M в Коуровке

Станция Eddy на 32-метровой вышке в Коуровке

1. В результате гиперспектрального зондирования атмосферы наземным ИК-Фурье спектрометром высокого разрешения получен временной ряд содержания CO_2 в атмосферном столбе за 2012–2022 гг. Сделана первичная оценка объема поглощенного CO_2 из атмосферы за вегетационный период с апреля по сентябрь, который варьируется в диапазоне от 1,41 – 2,35 т/га. Региональный тренд накопления CO_2 в атмосфере за 2012–2022 гг. составляет около 3 ppm/год.
2. Получены первые данные непрерывных измерений концентраций ПГ по методу вихревых пульсаций (Eddy covariance).



Среднемесячные данные по содержанию CO_2 и тренд с 2021 по 2022 гг. в атмосферном столбе по наблюдениям в Коуровке

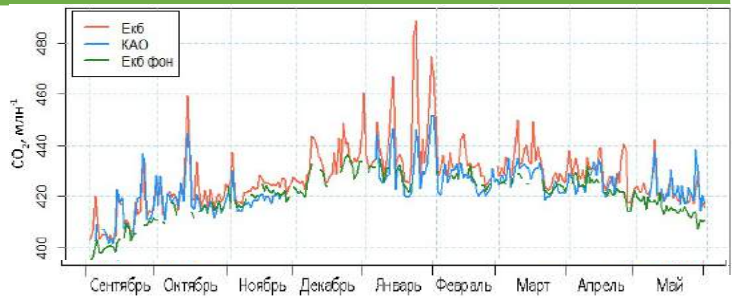
3. Результаты анализа данных дистанционного зондирования атмосферы демонстрируют хорошее согласие данных спутника ОСО-2 по концентрации CO_2 в атмосферном столбе с данными наземного в Коуровке, что позволяет рассчитывать на их дальнейшее привлечение при масштабировании проекта

Группа 2. Мониторинг парниковых газов in situ

Базовое учреждение: Лаборатория атмосферы ИПЭ УрО РАН
Руководитель – к.ф.-м.н. Маркелов Ю.И.

Газоанализатор Picarro G2401 в Коуровке

1. Выявлены среднегодовые значения концентрации CO_2 и CH_4 для Коуровки, которые в 2022 г. составили 423,05 ppm и 2006,0 ppb соответственно.
2. Выявлена динамика интенсивности эмиссии и стока CO_2 и CH_4 на территориях «Урал-Карбон» и в Екатеринбурге: в городе интенсивность эмиссии больше, чем на фоновой территории, примерно на 60 %.
3. Среднегодовые значения интенсивности эмиссии по методу «гигантских камер» CO_2 и CH_4, полученные для площадки «Урал-Карбон», составили 3560±1710 и 16±6 т/(км^2·год)



Среднесуточные концентрации CO_2 для Екатеринбурга (красная линия), фона (зеленая) и Коуровки (синяя)

«Урал-Карбон»

Основные результаты мониторинга

Группа 3. Лесная таксация и продуктивность лесов

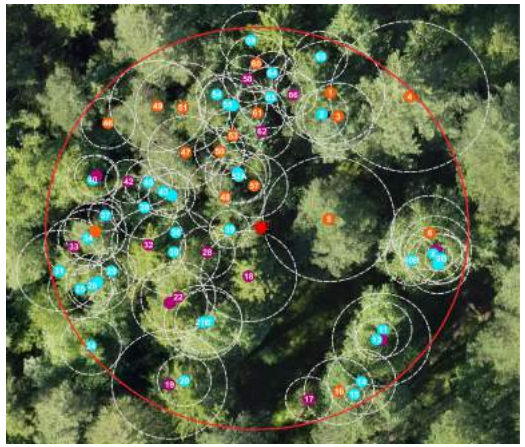
Базовое учреждение: Уральский государственный лесотехнический университет
Руководитель – д.б.н. Фомин В.В.

Картосхемы древостоев с указанием пробных площадей, созданные с использованием БПЛА

Произведена предварительная оценка депонирования углерода древостоями карбонового полигона с использованием лесоустроительных данных и путем измерения таксационных характеристик. Созданы цифровые карты местности, проведена аэрофотосъемка с использованием БПЛА обоих участков полигона.

2. По данным прямых измерений общая фитомасса древостоев участка в Коуровке составила от 202,0 до 279,0 т/га, в Северке – от 117,6 до 268,2 т/га, или в пересчете на поглощенный CO_2 – от 374 до 517 и от 218 до 497 т/га соответственно.

3. Проанализированы зависимости между биометрическими параметрами деревьев. Получены высокие корреляции между диаметром дерева и средним радиусом кроны для хвойных древесных пород. Разработана оригинальная технология оценки запасов древостоя и депонирования углерода с использованием данных наземных измерений. Это позволит получать высокоточные данные по запасам фитомассы на основе ДДЗ.



Пример картосхемы ПП с проекциями крон деревьев

Группа 6. Геоботаника и почвы

Базовое учреждение: УрФУ, департамент наук о Земле и о космосе. Руководитель – к.б.н. Радченко Т.А.

1. Проведены геоботанические и почвенные описания, выявлены зональные типы растительности и почв.
2. В автоморфных условиях на выположенных плакорах сформированы дерново-среднеподзолистые почвы, на склонах – горно-лесные бурые, в пределах речной долины на слабодренированных участках при близком залегании грунтовых вод – дерново-глеевые и дерново-глееватые.
3. Определены средние запасы углерода в почвенном пуле (таблица).
4. Проведен массовый отбор образцов для составления картосхем

Почвенная толща	Запасы $C_{орг.}$, т/га
Северка	
0–20 см	29,49±6,38
0–50 см	36,47±7,67
Весь разрез	38,61±8,61
Подстилка	12,61±4,95
Коуровка	
0–20 см	40,25±10,44
0–50 см	59,56±16,11
Весь разрез	70,30±19,75
Подстилка	11,83±9,46

«Урал-Карбон»

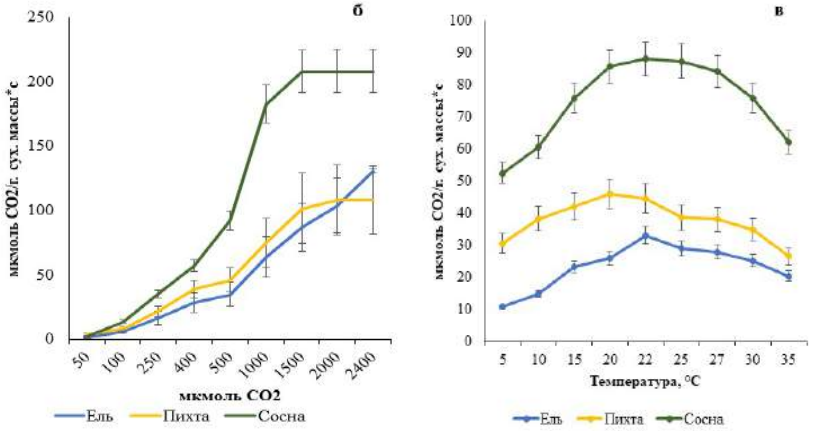
Основные результаты мониторинга

Группа 4. Интенсивность фотосинтеза

Базовое учреждение: УрФУ, кафедра экспериментальной биологии и биотехнологий
Руководитель – к.б.н. Киселева И.С.

Портативный газоанализатор Li-Cor 6400XT

1. Проведены измерения газообмена растений методом ИК-спектрометрии газоанализатором Li-Cor 6400XT. Скорость фотосинтеза в природных условиях у хвои ели была значительно выше, чем у пихты, и составила около 70 μM CO_2/г, у пихты – 25 μM CO_2/г сухой массы хвои в секунду. Однако у пихты больше доля массы хвои в массе побега.
2. В условиях роста температуры и концентрации CO_2 в атмосфере *P. sylvestris* будет более эффективно связывать CO_2, чем *A. sibirica* и P. abies. В то же время *A. sibirica* и *P. abies* как теневыносливые виды лучше усваивали CO_2 при низких значениях интенсивности света.
3. Изучена сезонная динамика интенсивности фотосинтеза. Показаны эндогенные флуктуации фотосинтеза и дыхания, не зависящие от экологических факторов. Выявлены особенности структуры ФС тканей



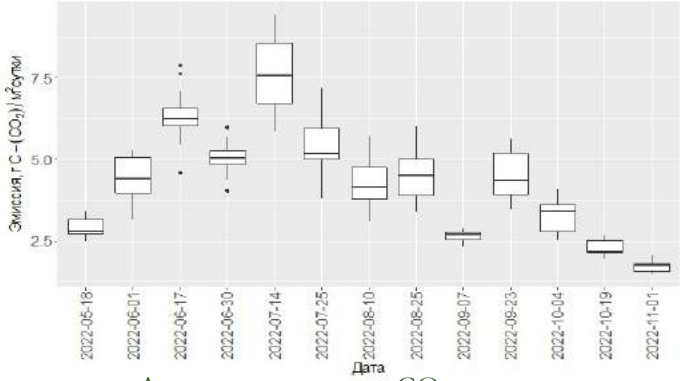
Углекислотные (б) и температурные (в) кривые фотосинтеза

Группа 5. Эмиссия из почв и валежа

Базовое учреждение: Институт экологии растений и животных УрО РАН
Руководитель – д.б.н. Веселкин Д.В.

Полевой респирометр Li-8100A

1. Собраны массивы данных измерения дыхания почвы и валежа закрытым динамическим камерным методом. Максимальных значений эмиссионная активность достигала в середине июля (7,6±1,2 мкмоль CO_2/м^2/с).
2. Определена интенсивность эмиссии CO_2 на разных стадиях деструкции древесных остатков. На первой стадии разложения она относительно невысокая и составляет всего 12,09±1,75 мг C-CO_2/м^2/ч, на второй стадии – 24,85±2,41 мг C-CO_2/м^2/ч), на третьей – 41,80±1,60 мг C-CO_2/м^2/ч.
3. Подтверждена сезонная изменчивость интенсивности эмиссии CO_2 из почв и валежа в связи с погодными и ландшафтными факторами



Динамика эмиссии CO_2 из почвы в пихтово-еловых лесах (Коуровка)

«Урал-Карбон»

Основные результаты мониторинга

Группа 7. Интродукция, селекция и биоинженерия растений	Базовое учреждение: Ботанический сад УрО РАН Руководитель – д.б.н. И.В. Петрова	Базовое учреждение: Ботанический сад УрФУ Руководитель – к.б.н. В.В. Валдайских	Уральский государственный аграрный университет Руководитель – к.с.-х.н. М.Ю. Карпухин

Производится изучение и отбор перспективных древесных и травянистых видов растений для формирования карбоновых ферм в различных типах ландшафтов, произведено изучение скорости роста местных и инорайонных древесных и травянистых высокотравных растений в зависимости от эдафических и природно-климатических условий, производится оценка депонирования углерода в почвенно-растительном покрове ландшафтов болот и торфоразработок; производится оценка углеродсеквестирующего потенциала агрогенно-преобразованных почв Среднего Урала и пути регулирования при сельскохозяйственном использовании. Проведено изучение роста и развития высокопродуктивных травянистых видов, их химического состава, а также отработка методики пиролиза. Продуктивность рассматриваемых нетрадиционных высокотравных многолетних и однолетних видов оказалась сравнимой или даже выше продуктивности традиционно кормовой культуры – кукурузы. Наибольшей фитомассой характеризовался *Polygonum weyrichii* F. Schmidt – 100,3±21,5 т/га в год сырой или 22,5±4,8 г/га сухой массы, в 2021 г. - 152 т сырой массы /га или 36,7 т сухой массы /га.

Культура	Сырая масса, т/га	Сухая масса, т/га	Углерод, т/га
Amaranthus caudatus L.	31,8±5,0	6,2±1,0	2,13
Amaranthus cruentus L.	23,7±5,0	6,7±1,4	2,53
Amaranthus hypochondriacus L.	28,5±4,9	6,0±1,0	2,38
Echinops sphaerocephalus L.	55,1±18,0	22,3±7,3	9,52
Polygonum weyrichii F. Schmidt	100,3±21,5	22,5±4,8	9,54
Miscanthus sinensis Andersson	27,3±1,0	15,0±1,4	6,65
Zea mays L. «Обский 140 СВ»	68,3 ± 6,1	23,5 ± 1,1	10,1

Продуктивность некоторых исследуемых травянистых культур в 2022 г.

«Урал-Карбон»

Экспериментальные карбоновые фермы

1. Тестирование технологий лесовосстановления

УГЛТУ: рекультивируемый гранитный карьер

Ожидается, что через 15 лет после начала выполнения проекта скорость депонирования углерода будет составлять около 20 тCO_2/год на га

Пример рекультивированного отвала

2. Тестирование агротехнологий и агрофитоценозов

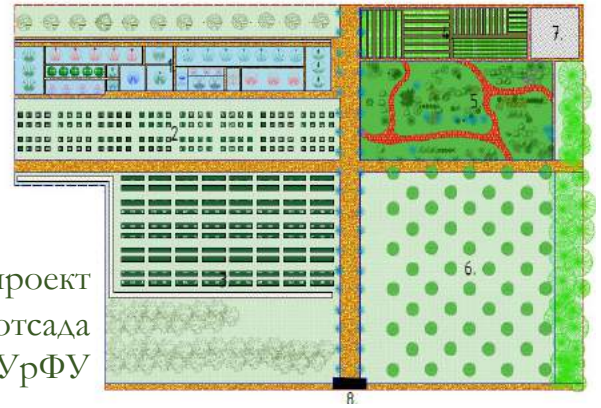
Учебно-опытного аграрный участок УрГАУ

Расчетный объем на участке (25 га)
факт (базовый сценарий) – 50 т CO_2/год,
план – 375 т CO_2/год/25 га

Конопляное поле на учебно-опытном участке УрГАУ

3. Научно-образовательные карбоновые фермы

Дизайн-проект фермы ботсада УрФУ



На базе ботанических садов УрФУ и УрО РАН организованы участки карбоновых ферм с научными, образовательными и просветительскими функциями, площадь – 3 га

4. Тестирование технологий торфонакопления – совместно с индустриальным партнером планируется обводнение торфоразроботок, площадь – до 20 тыс. га

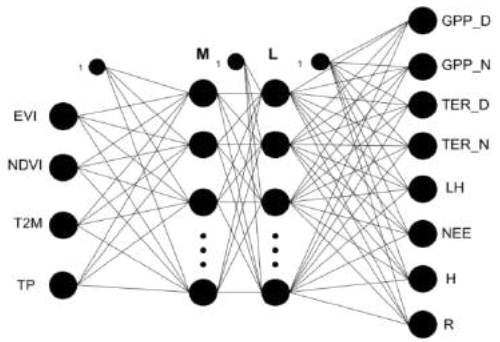
Разработка и/или испытания технологий по уменьшению эмиссии и увеличению поглощения ПГ

1. Перевод органического вещества крупнотравных травянистых растений в трудноразлагаемый биоуголь пиролизом

2. Конверсия углекислого газа в метанол и в дальнейшем в диметилкарбонат (Carbon capture and storage, CCS)

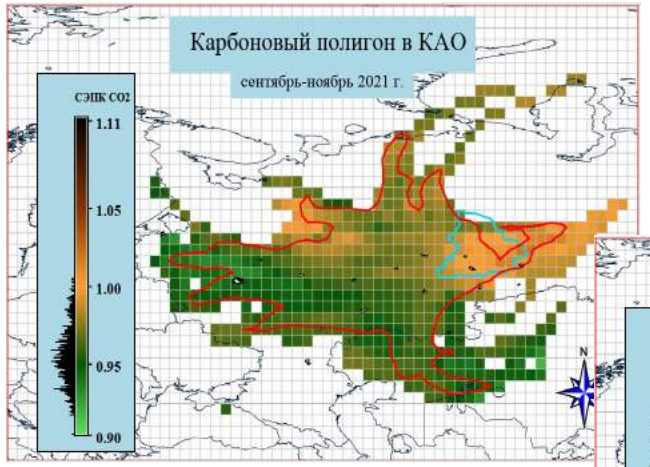
3. Использование комплексонатов, полученных в результате ферментативной аэробной обработки отходов птицефабрик

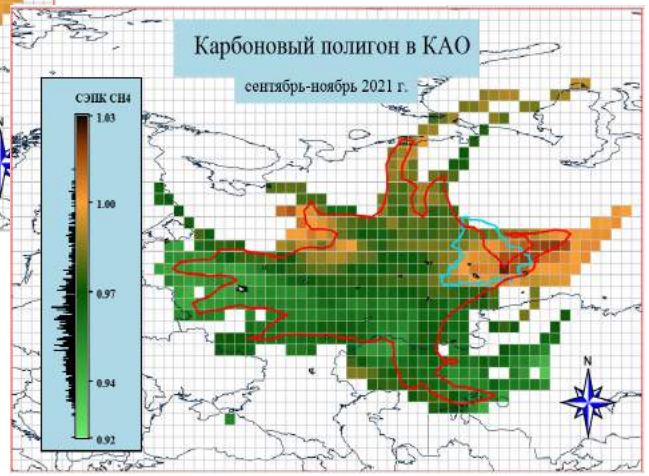
Разработка математических моделей



Розанов А.П. «Нейросетевая модель для оценки потоков углерода в бореальных лесных экосистемах» // Свидетельство № 2022664299. Дата приоритета 19.07.2022

1. Предложена **оригинальная нейросетевая модель для оценки потоков углерода**. Модель обучалась с использованием набора данных с сервиса FLUXNET для метеостанции Ru-Fyo. Связывает данные мультиспектральных сенсоров космического базирования типа MODIS (спутники НАСА Aqua и Terra), данные о температуре воздуха и осадков с данными, получаемыми в рамках наземной сети станции FLUXNET демонстрирует удовлетворительное качество обучения (тренировки) и возможность дальнейшего развития. Имея на входе спутниковые данные в виде вегетационных индексов NDVI и EVI, температуру воздуха на высоте 2 м и уровень осадков для лесной бореальной экосистемы (TP), модель выдает на выходе потоки углерода (GPP — валовая первичная продуктивность, TER — экосистемное дыхание), скрытого тепла (LH), чистый экосистемный обмен (NEE) на тестовом наборе данных модель продемонстрировала хорошую точность воспроизведения данных по GPP, TER и NEE с коэффициентами корреляции R больше 0,9. После обучения модель была апробирована на участке карбонового полигона в Коуровке.



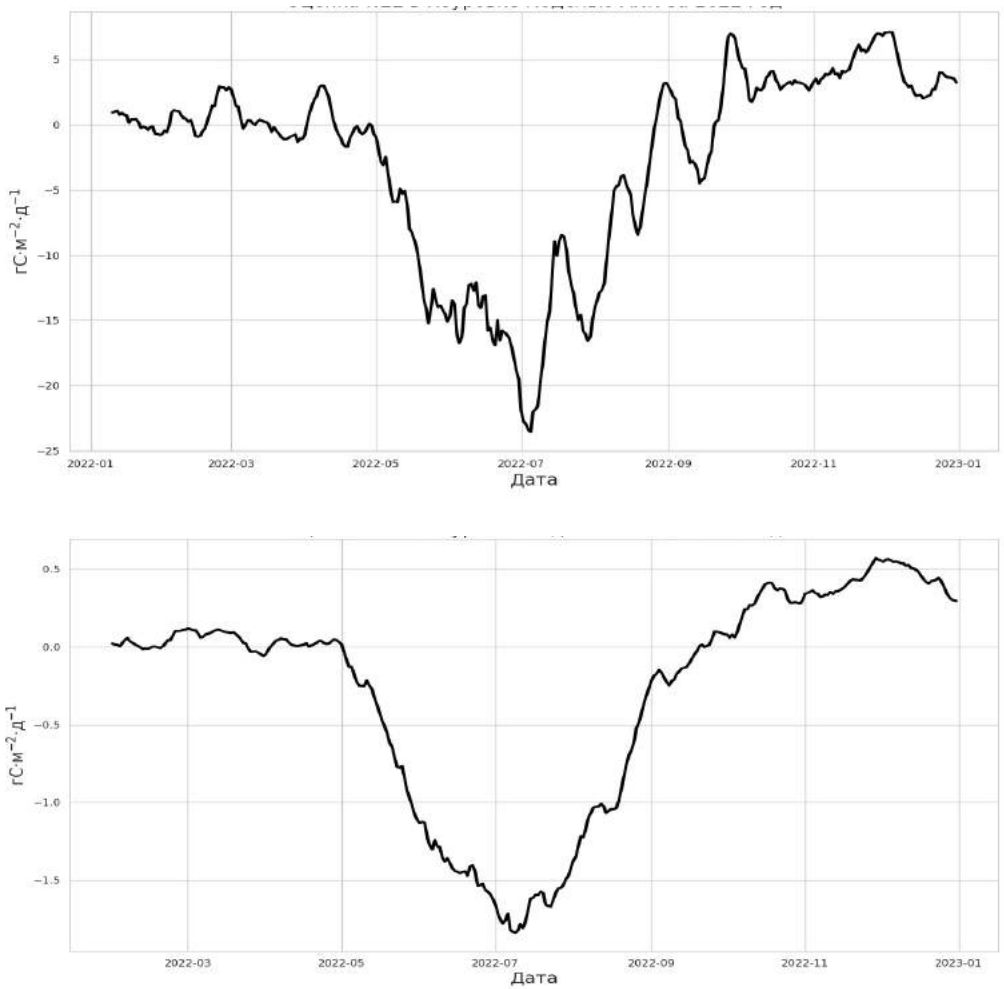


Нормированное среднее эффективное поле концентрации диоксида углерода и метана в ЗМ(50) осенью 2021 г. по измерениям на полигоне «Урал-Карбон»

2. Произведена модификация алгоритма и программного обеспечения для решения **2D задач о флюид локации атмосферы** с целью обеспечения расчета горизонтальных потоков дальнего переноса парниковых газов на замкнутых границах зоны моделирования. ПО позволяет произвести построение карт среднего эффективного поля концентраций парниковых газов, среднего эффективного поля источников-стоков, расчет балансов потоков ПГ, оценку показателей дисбаланса потоков эмиссии и поглощения ПГ за период наблюдений в исследуемом регионе на основе данных с одного или нескольких пунктов мониторинга. Получены интегральные показатели эмиссии и поглощения диоксида углерода для различных биомов Восточно-Европейской равнины по результатам наблюдения с территории Коуровской астрономической обсерватории. В настоящий момент разрешение метода (размер ячейки) составляет 50 км, ведется работа по его уменьшению и сужению области исследования до размеров Свердловской области

«Урал-Карбон»

Предварительные данные по балансу углерода в Коуровке



Интегральная оценка NEE в Коуровке с 01.01.2022 по 31.12.2022 (сверху - скользящее среднее за 10 дней, снизу – за 30 дней)

Первичная оценка объема поглощенного из атмосферы углекислого газа ($тCO_2$/га) в Коуровке получена независимым методом с использованием разработанной специалистами «Урал-Карбон» искусственной нейронной сети (ANN) для NEE и составляет :

- **за календарный 2022 г.: - 95,155±0,855 гС/(м^{2}г)**
- **за вегетационный сезон с апреля по сентябрь 2022 г.: - 133,042±0,961 гС/(м^{2}г)**

Оценка неопределенности на тестовом наборе данных составила величину около 30 %.

Эта величина близка к объему поглощенного из атмосферы углерода, рассчитанному на основе данных наземного гиперспектрального зондирования атмосферы ИК-Фурье спектрометром высокого разрешения, который составляет около 150 гС/(м^{2}г) за вегетационный период с апреля по сентябрь.

Расхождение между двумя этими независимыми методами составляет около 15 %, что лежит в пределах среднеквадратичной ошибки метода ANN для NEE.

«Урал-Карбон»

Результаты образовательной и просветительской деятельности

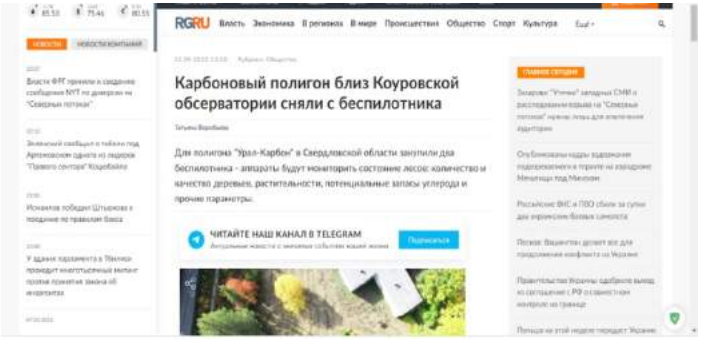
№ п/п	Наименование разработанной образовательной программы	Тип программы	Год внедрения
1	Модернизация образовательной программы 06.03.01 «Биология»	разработан модуль «Биологические аспекты климатических изменений» объемом 6 зачетных единиц = 216 часов (4 курс), включающий 2 дисциплины: «**Мониторинг климата и климатическое регулирование**» и «**Экология фотосинтеза и дыхания биоты**». В рамках общего курса «Физиология растений» реализовано 2 темы: «**Глобальная роль фотосинтеза и газовый состав атмосферы**» и «**Экологические факторы ассимиляции углекислоты растениями**» объемом 8 часов. На курсе обучается **52 студента**	2022
2	Модернизация образовательной программы магистратуры 06.04.01. «Фундаментальная биология и биотехнологии».	введен новый раздел «**Технологии депонирования углерода**». Объем раздела: 4 ауд.часа, общая трудоемкость – 12 часов (0,3 з.е.). Обучение в рамках раздела уже прошли **12 человек**	2022
3	Модернизация «Большого специального практикума» образовательной программы 06.03.01 «Биология»	введен раздел «**Изучение фотосинтеза и дыхания основных лесообразующих пород Карбонового полигона «Урал-Карбон**» Всего – 50 аудиторных часов лабораторных работ, общая трудоемкость раздела – 72 часа (2 з.е.). Лабораторный практикум прошли **12 человек**	2022
4	Модернизация образовательной программы 05.03.06 «Экология и природопользование»	введены междисциплинарные курсы «**Аэрокосмические и дистанционные методы**» 108 час 5 сем и «**Геоинформационные системы и технологии обработки пространственных данных**». Объем часов: 72 час 6 семестр. Обучение прошли **22 студента**	2022
5	Модернизация образовательной программы 05.03.04 «Гидрометеорология»	введены междисциплинарные курсы «**Физика климата и окружающая среда**» Объем часов: 108 час 6 сем; «**Динамическая метеорология**», объем: 108 часов, обучилось **14 студентов** и «**Космические методы исследования в метеорологии**», 108 ч., обучилось **10 студентов**	2022
6	Новая дополнительная профессиональная образовательная программа повышения квалификации	Внедрена ДОП «**Основы обработки, анализа, моделирования и представления данных в программной статистической среде R**» по оценке объемов биомассы древесины и запасов углерода, реализована с первым набором слушателей (обучились **10 человек**)	2023

«Урал-Карбон»

Формальные результаты научной, образовательной и просветительской деятельности

За отчетный период по теме проекта с ссылкой на госзадание опубликовано 18 статей из списка WoS/Scopus (в т.ч. 4 статьи Q1), кроме того 11 статей ядра РИНЦ и ВАК, 18 прочих публикаций РИНЦ.

№ п/п	Наименование мероприятия	Место проведения	Сроки проведения	Количество участников
1	Всероссийская конференция молодых ученых "Экология: факты, гипотезы, модели" с отдельной секцией по карбоновой тематике	ИЭРиЖ, Екатеринбург	18–22 апреля 2022	110
2	I, II Молодежные школы-семинары "Урал-Карбон" на базе карбонового полигона Свердловской области	УрФУ	29 октября 2021 8–9 декабря 2022	80
3	Лекции для детей, педагогов, населения	различные площадки	постоянно	100+
4	Публикации (более 500 ссылок) в медиапространстве в различной форме: интервью, статьи, телеинтервью. Документальный фильм «Урал-Карбон»	различные площадки	постоянно	



Наши индустриальные партнеры

Российские железные дороги

Трубная Металлургическая Компания

ГРУППА СИНАРА

Группой «Синара» был закуплен и смонтирован учебно-лабораторный модуль площадью 147,3 м^2, произведено благоустройство территории (асфальтирование дорог, установка нового ограждения и автоматических ворот). Помещения позволяют производить необходимые на полигоне работы с научным оборудованием, а также учебные мероприятия, научные семинары, конференции.

Карбоновый полигон «Урал-Карбон» ведет серьезную работу по привлечению индустриальных партнеров. Подписано соглашение с **ОАО «РЖД»**. Подтверждает свое участие в проекте **ПАО «Трубная Металлургическая Компания».**

Музейно-экспериментальный кластер «Зеленый кампус» на базе Коуровской астрономической обсерватории УрФУ (проект)

План работы карбонового полигона Свердловской области «Урал-Карбон» в 2023-2025 гг.

Группа 1. Дистанционное зондирование

Задача 1. Проведение непрерывных измерений содержания углеродсодержащих ПГ для определения вертикальных потоков с помощью метода Eddy Covariance
Задача 2. Проведение подспутниковых измерений в атмосферном столбе ИК Фурье-спектрометром
Задача 3. Создание региональной климатической модели, учитывающей транспорт потоков ПГ и модели машинного обучения, связывающей спутниковые мультиспектральные наблюдения и метеоданные с потоками углерода в лесные экосистемы

Будет проведена апробация и реализация метода турбулентных пульсаций, будут определены величины и направления потоков для исследуемых ландшафтов. Будет выполнено совершенствование моделей на основе машинного обучения, выполнена фактическая количественная оценка потоков

Группа 2. Мониторинг ПГ in situ

Задача 1. Мониторинг содержания ПГ в приземном слое атмосферы лазерным газоанализатором Picarro
Задача 2. Разработка 2D-карт балансов эмиссии-поглощения парниковых газов по данным наблюдений на полигоне «Урал-Карбон»
Задача 3. Разработка интегральной технологии для построения 3D-полей концентраций и потоков парниковых газов в атмосфере

Будут созданы региональные балансовые 2D и 3D карты средних эффективных полей концентраций и объемных мощностей источников и стоков с максимально возможным для единичного пункта мониторинга пространственным разрешением для карбонового полигона и для Свердловской области

Группа 3. Лесная таксация

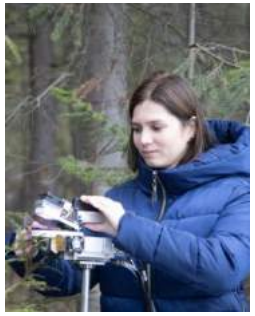
Задача 1. Интерпретация таксационных характеристик лесов и лесоустроительных материалов, а также полученных на основе лидара и мультиспектральной камеры БПЛА
Задача 2. Анализ данных наземных измерений и дешифрирование ДДЗ
Задача 3. Оценка запасов углерода древостоев на территории Свердловской области

На основе данных, полученных с БПЛА на базе квадрокоптера DJI Matrice 300 RTK с системой воздушного лазерного сканирования и мультиспектральной камерой будут получены высокодетализированные цифровые карты древостоев, будут получены многомерные статистические и (или) нейросетевые модели оценки запаса углерода в древостоях на основе данных ДДЗ. В результате применения полученных на полигоне моделей, на основе данных ДДЗ, а также с привлечением лесоустроительных данных, будут получены оценки запаса углерода и продуктивности древостоев на территории региона

«Урал-Карбон»

План работы карбонового полигона Свердловской области «Урал-Карбон» в 2023-2025 гг.

Группы 4, 5. Фотосинтез и дыхание



Задача 1. Формирование массивов данных фотосинтетической ассимиляции и эмиссии углерода ПГ
Задача 2. Расчет объемов поглощения и эмиссии CO_2 и CH_4 в суточном, годовом циклах и в разных условиях

Будет продолжено формирование массивов данных фотосинтетической активности и дыхания растений аборигенной флоры с помощью Li-Cor 6400 XT и Waltz GFS 3000; дыхания почвы и лесной подстилки, валежной древесины – Li-8100A и Li-7810SC. На основе коррелятивных и регрессионных зависимостей будут построены модели для определения объемов фотосинтетической ассимиляции и эмиссии ПГ гетеротрофным блоком лесных экосистем. Будет проведена верификация оценок баланса стока и эмиссии CO_2 и CH_4, получаемых для данной территории дистанционными и интегральными методами

Группа 6. Почвы и геоботаника

Задача 1. Формирование массивов геоботанических данных и оценок емкости мобильных пулов углерода (гумус почв, мортмасса)

На основе массовых аналитических данных будет составлена картосхема количественного распределения углерода участков карбонового полигона. Будет дана оценка пространственно-временных особенностей распределения мобильных пулов углерода; анализ разных методов оценки углерода. Будет представлено графическое распределение углерода в компонентах ландшафтов Свердловской области в соответствии с типизацией ландшафтов

Группа 7. Интродукция и селекция

Задача 1. Выполнение интродукционных работ, привлечение новых видов и форм быстрорастущих высокопродуктивных растений местной и интродуцированной флоры

На площадках ботанических садов УрФУ и УрО РАН, учебного хозяйства УрГАУ будут организованы участки экспериментальных карбоновых ферм с повышенным видовым разнообразием перспективных видов и форм древесных и травянистых растений аборигенной флоры и интродуцентов. Будут проведены работы по выявлению совокупного влияния текущего и прогнозируемого изменения климатических факторов на формирование и жизнеспособность изучаемых видов и форм. Будет произведен подбор перспективных по секвестрационному потенциалу видов, сортов и генотипов растений и фактическое их использование на карбоновых фермах региона

«Урал-Карбон»

Общий план работ по научным исследованиям

	2023	2024	2025
Нейросетевая модель потоков ПГ			
Модель потоков ПГ на основе флюид-локации атмосферы			
Модель оценки биомассы древостоев на основе ДДЗ			
Региональная климатическая модель			
Модель транспорта ПГ			
Определение вертикальных потоков ПГ методом Eddy Covariance			
Подспутниковый мониторинг ПГ (Фурье-спектрометр, Picarro)			
Камерные методы изучения потоков ПГ (ФС-сток, эмиссия)			
Инвентаризация запасов углерода (почвы, мортмасса, биомасса)			
Интродукция и селекция высокопродуктивных растений			
	Полигон	**Полигон**	**Регион**

2023. Осуществление системы полевых измерений для мониторинга запасов углерода и потоков парниковых газов: имеется оборудование и методики для оценки всех пулов углерода и потоков: NEE, GPP, R, NPP в пределах полигона. Создание цифровых карт пулов углерода: почв, надземной фитомассы, мортмассы. Создание региональной климатической модели, нейросетевой модели потоков ПГ, модели потоков ПГ на основе флюид-локации атмосферы

2024. Валидация полученных моделей потоков парниковых газов для полигонов, уточнение имеющихся конверсионных коэффициентов
на основе прямых измерений компонентов регионального углеродного баланса, мониторинг репрезентативных экосистем

2025. Валидация полученных моделей потоков парниковых газов для зональных типов растительности в пределах Свердловской области, прямые измерения в типах ландшафта, цифровые карты пулов и потоков

«Урал-Карбон»

Образовательная и просветительская деятельность

№	Мероприятие	Тип программы	Год
1	Адаптация существующих и разработка новых бакалаврских, магистерских и аспирантских программ к задачам мониторинга климатически активных газов.	Разработка новой образовательной магистерской программы «**Экологический менеджмент и технологии декарбонизации**» с двумя траекториями – **30 человек** ежегодно. Модернизация образовательной программы 06.03.01 «Биология»: будет введен модуль «**Биологические аспекты климатических изменений**» объемом 216 часов (4 курс), включающий 2 дисциплины: «**Мониторинг климата и климатическое регулирование**» и «**Экология фотосинтеза и дыхания биоты**», разработана, готова к внедрению. Будет обучено **не менее 12 человек**. Разработана и находится на стадии лицензирования новая образовательная программа бакалавриата 35.03.03 «**Агрохимия и агропочвоведение**. В программе предусмотрены дисциплины (модули) с разделами по карбоновой тематике: «**Агроэкологический мониторинг и управление плодородием почв**», 7 з.е., 252 часа и «**Органическое сельское хозяйство**», направленные на оценку и снижение эмиссии парниковых газов агроэкосистем и на повышение секвестрации: 5 з.е., 180 часов (**45 человек**). Разработана, находится на экспертизе новая образовательная программа магистратуры «**Биоразнообразие в меняющемся мире**». В программе предусмотрены модули «**Глобальная экология**» - 3 з.е., 108 часов, «**Экобиотехнологии**» – 3 з.е., 108 часов с разделами по проблемам климатических изменений и их регулирования, создания карбоновых полигонов и ферм. Будет реализована на русском и английском языках, общая трудоемкость – 240 часов. **Не менее 12 человек**.	2023-2024
2	План включения в существующие программы междисциплинарных курсов	Внедрение модернизированной образовательной программы магистратуры «**Биоразнообразие в меняющемся мире**» с новыми междисциплинарными модулями «**Глобальная экология**» - 3 з.е., 108 часов, «**Экобиотехнологии**» – 3 з.е., 108 часов с разделами по проблемам климатических изменений и их регулирования, создания карбоновых полигонов и ферм. **Не менее 10 студентов**.	2023-2024
3	Переход на новые образовательные программы 4-го поколения	**Переход на новые образовательные программы 4-го поколения** потребует создание новых образовательных программ с траекториями, соответствующими карбоновой тематике. Будет создано и внедрено в учебный процесс не менее двух образовательных программ по направлениям бакалавриата / специальностям «Биология» (набор **60 студентов**) и «Экология и природопользование» (набор **30 студентов**) и двух образовательных программ магистратуры по направлениям «Биология» (набор **20 студентов**) и «Экология и природопользование» (набор **20 студентов**).	2023-2025
4	Проведение выездных летних школ и мастер-классов, иных мероприятий для молодых ученых	На участках карбонового полигона будут проведены **Молодежные школы**: в Коуровской астрономической обсерватории, в учебно-опытном лесхозе, на биостанции УрФУ (**не менее 150 человек**). На участках полигона в Уральском учебно-опытном лесхозе УГЛТУ, на биостанции УрФУ и в ботаническом саду УрФУ будут проводиться **учебные практики со студентами** (**не менее 250 человек**)	2023-2025

«Урал-Карбон»

Карбоновые Полигоны
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ГРУППА СИНАРА

Уральский федеральный университет

Уральский государственный лесотехнический университет УГЛТУ

ИЭРиЖ
Институт экологии растений и животных

Институт математики и механики им. Н.Н. Красовского

Ботанический сад УрО РАН
Institute Botanic Garden UB RAS

Уральский государственный аграрный университет УрГАУ

Спасибо за внимание!

Thanks for your attention!

Исследования поддержаны Министерством науки и высшего образования РФ,
проект № FEUZ-2023-0023

The study was supported by the state assignments of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation,
project No. FEUZ-2023-0023