

**План исследований на карбоновом полигоне «Урал-Карбон» в 2023-2025 гг.  
(из Программы создания и функционирования карбонового полигона  
в Свердловской области «Урал-Карбон» на 2023-2025 гг.)**

**Наименование организации, на базе которой создается карбоновый полигон – Оператор карбонового полигона:**

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»

**Участники программы создания и функционирования карбонового полигона:**

Уральский государственный лесотехнический университет  
Уральский государственный аграрный университет  
Институт экологии растений и животных УрО РАН  
Институт промышленной экологии УрО РАН  
Институт математики и механики УрО РАН  
Ботанический сад УрО РАН

**Наименование индустриального партнера, участвующего в реализации программы создания и функционирования карбонового полигона:**

АО «Синара - Транспортные машины»  
ПАО «Трубная металлургическая компания»

**Цели создания и функционирования карбонового полигона**

**Миссия** – общая стратегическая многолетняя (до 2030–2035 гг.) цель: отработка регионально верифицированной методики, учитывающей ожидаемые климатические изменения, определение объемов депонирования углерода наземными экосистемами и разработка оптимальных базовых технологий мониторинга депонирования и секвестрации углерода.

**Ближние (2023–2025 гг.) цели:**

1. Количественная оценка эмиссии и депонирования парниковых газов ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{N}_2\text{O}$ ) в природных и трансформированных ландшафтах Свердловской области посредством объединения результатов наземных и дистанционных методов для понимания пространственной и временной изменчивости депонирования углерода и динамики потоков климатически активных газов.
2. Отработка технологии ассимиляции разнородных данных (спутниковых и наземных; инвентаризационных, дистанционных и прямых измерений) в общую модель источников и стоков на территории региона и РФ. Верификация с помощью прямых наземных

измерений алгоритмов и вычислительных технологий для определения содержания атмосферных газов несколькими дистанционными методами.

3. Разработка и развитие секвестрационных технологий, направленных на практическую деятельность по ускоренному депонированию атмосферного углерода в природных средах или на его прямое извлечение в результате реализации инженерно-технических проектов.

#### **Задачи создания и функционирования карбонового полигона:**

1. Организация синхронных подспутниковых измерений наземными средствами потоков парниковых газов ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{N}_2\text{O}$ ) с помощью метода EddyCovariance, построение вертикальных профилей содержания парниковых газов ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{N}_2\text{O}$ ) в нижнем слое тропосферы и мониторинга с помощью беспилотных летательных аппаратов.
  2. Оценка сезонных, годовых и многолетних объемов депонирования, на основе оценки соотношения стока и эмиссии, углерода из атмосферы разными типами таежных экосистем. Оценка ландшафтных, погоднo-климатических и антропогенных факторов депонирования углерода экосистемами и разработка на основе этого прогностических моделей. Для этого необходимо:
    - a. Формирование массивов данных регулярных метеорологических наблюдений для верификации ретроспективного климатического анализа.
    - b. Оценка фотосинтетической активности и дыхания растений в разных типах ландшафтов и экосистем; оценка дыхания почвы с разделением вклада в дыхание разных почвенных горизонтов.
    - c. Оценка существующих запасов углерода в древесине, мортмассе, почве (гумусе) в природных и трансформированных экосистемах, а также пространственно-временных особенностей их распределения.
  3. Выявление наиболее продуктивных сообществ и отдельных видов растений. Разработка и подготовка опытных образцов технологий секвестрации атмосферного углерода.
  4. Создание единого пакета суперкомпьютерного ПО на основе существующих программных пакетов для моделирования циркуляции атмосферы и транспорта химических примесей на региональном уровне.
  5. Подготовка кадров высшей квалификации в области технологий для низкоуглеродной индустрии, сельского и муниципального хозяйства. Популяризация знаний в области карбоновой тематики.
- Общий объем финансирования Программы создания и функционирования карбонового полигона, в том числе по годам реализации

#### Планируемые результаты реализации Программы создания и функционирования карбонового полигона

Будет дана количественная оценка величины эмиссии и секвестрирования углерода как отдельными компонентами экосистем, так и ландшафтами в целом: природными и измененными, наиболее представленными в Свердловской области:

1. Будет детально проработана технология оценки потоков парниковых газов ( $\text{CO}_2$  и  $\text{CH}_4$ ) по методу турбулентных пульсаций для ландшафтов, вовлеченных в исследование, определены параметры оптимальной установки оборудования в зависимости от типа, высоты растительности, особенностей ландшафтов. Определены характерные величины и направления этих потоков для различных сезонов и типов растительности.
2. Будут сделаны оценки величины изотопной дискриминации  $^{13}\text{C}$  в углекислом газе при дыхании растений для характерных типов растительных сообществ Среднего Урала, а также сделана оценка возможности дистанционного зондирования величины  $\delta^{13}\text{CO}_2$  по данным спутниковых спектрорадиометров типа IASI/METOP для оценки благополучия фотосинтезирующих растительных сообществ целевой территории.
3. Будет разработано комплексное ПО начального уровня на основе существующих компьютерных моделей общей циркуляции атмосферы и транспорта химических примесей для оценки стоков и источников на территории Свердловской области по результатам всех измерений данного проекта, от измерений потоков методом турбулентных пульсаций до данных дистанционного спутникового зондирования.
4. Будет проведена верификация данных спутникового мониторинга парниковых газов в атмосфере целевого региона по результатам зондирования атмосферы ИК-Фурье спектрометром высокого разрешения наземного базирования.
5. На основе массовых измерений будут сформированы массивы данных по определению запасов углерода и азота в почвах, мортмассе, надземных и подземных органах растений на участках карбонового полигона, а также в ходе полевых работ с целью определения секвестрационной способности основных типов ландшафтов Свердловской области).
6. Будет проведена оценка фотосинтетической активности отдельных видов растений и фитоценозов с целью прогнозирования секвестрационного потенциала экосистем, а также сформированы массивы данных по измерению дыхания биоты и почв для характеристики баланса стока и эмиссии  $\text{CO}_2$  в разных типах сообществ.
7. Будут сопоставлены результаты нескольких технологий определения морфологических и таксационных характеристик участков древостоев карбоновых полигонов, а также будут определены запасы древесины и дана оценка продуктивности насаждений в ходе полевых работ.

**План проведения наблюдений на карбоновом полигоне в 2023-2025 гг.**

№	Наименование работы	Результат работы	Срок выполнения работ
1	<p>Проведение квазинепрерывных измерений содержания углеродсодержащих парниковых газов в приземном слое атмосферы автоматизированным лазерным газоанализатором Picarro и с использованием мачтового оборудования для определения вертикальных потоков (эмиссии и стока) парниковых газов (CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, H<sub>2</sub>O) с помощью метода турбулентных пульсаций (Eddy Covariance);</p>	<p>будут опробованы (2023) и реализованы (2024-2025 гг.) технологии оценки потоков парниковых газов (CO<sub>2</sub> и CH<sub>4</sub>) с использованием:</p> <p>а. стандартного метода турбулентных пульсаций (Eddy Covariance) для ландшафтов, вовлеченных в исследование;</p> <p>б. оригинального метода флюид-локации атмосферы (ФЛА). Новый метод дистанционного зондирования атмосферы, основанный на совместном анализе данных локальных измерений содержания (концентраций) примеси и результатов моделирования динамики атмосферы, реализует приборно-вычислительную технологию пассивной ветровой локации атмосферы. Это метод объективного установления региональных объёмов эмиссии парниковых газов и определения их географического распределения на основе данных мониторинга.</p> <p>Будут определены характерные величины и направления этих потоков для различных сезонов и типов растительности на основе данных первого года исследования нового оборудования на основе станции Eddy Covariance на основе газоанализатора CO<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>O закрытого типа Li-7200RS и газоанализатора Picarro G2401</p>	<p>1 квартал 2023 г. - 4 квартал 2025 г.</p>

№	Наименование работы	Результат работы	Срок выполнения работ
2	Продолжение работ по созданию единого пакета ПО на основе существующих программных пакетов для моделирования циркуляции атмосферы и транспорта химических примесей на региональном уровне (при условии доступа к данным хотя бы одного источника ретроспективного климатического анализа); по созданию пакета ПО реализующего методы машинного обучения для построения эмпирической модели, связывающей спутниковые мультиспектральные наблюдения и метеоданные с потоками углерода в лесные экосистемы	будет выполнено дальнейшее совершенствование оригинальной нейросетевой модели для оценки потоков углерода и ПО на основе существующих компьютерных моделей общей циркуляции атмосферы и транспорта химических примесей (2023) и фактическая оценка стоков и источников на территории полигона (2024) и Свердловской области (2025) по результатам измерений данного проекта.	1 квартал 2023 г. - 4 квартал 2025 г.
3	Организация подспутниковых измерений наземными средствами содержания парниковых газов (CO <sub>2</sub> , CH <sub>4</sub> ) в атмосферном столбе методами дистанционного зондирования с помощью ИК Фурье-спектрометра наземного базирования	будет проведена ежегодная верификация данных спутникового мониторинга парниковых газов в атмосфере целевого региона по результатам зондирования атмосферы ИК-Фурье спектрометром высокого разрешения наземного базирования. Будет сделана оценка возможности определения величины $\delta^{13}\text{CO}_2$ в атмосфере по данным спутниковых спектрометров типа IASI/METOP для оценки состояния фотосинтезирующих растительных сообществ целевой территории	1 квартал 2023 г. - 4 квартал 2025 г.
4	Продолжение регулярных метеорологических наблюдений	будут сформированы массивы данных регулярных метеорологических наблюдений с автоматической метеостанции (температура, влажность, скорость и направление ветра, инсоляция, количество жидких осадков), сопоставление данных ретроспективного климатического анализа (ECMWF, Copernicus, NCEP/NCAR при наличии доступа) для участков полигона с массивами климатических данных	1 квартал 2023 г. - 4 квартал 2025 г.

№	Наименование работы	Результат работы	Срок выполнения работ
5	<p>Разработка 2D-карт балансов эмиссии-поглощения парниковых газов по данным наблюдений на полигоне «Урал-Карбон» и других пунктов мониторинга на территории Свердловской области; разработка интегральной технологии (наземные измерения плюс вертикальные распределения) для построения 3D-полей концентраций и потоков парниковых газов в атмосфере</p> <p>-</p>	<p>будут составлены: ежегодные (сезонные) карты средних эффективных полей концентраций основных парниковых газов (метан и диоксид углерода) в регионе проведения мониторинга, ежегодные (сезонные) карты средних эффективных полей полной (природной и антропогенной) эмиссии анализируемых парниковых газов с определением территорий, являющихся их источниками или стоками, с оценками объемов их эмиссии или поглощения; региональный баланс потоков парниковых газов с количественной оценкой степени нарушения климатического равновесия региона</p>	<p>1 квартал 2023 г. - 4 квартал 2025 г.</p>
6	<p>Интерпретация таксационных характеристик лесов, полученных с привлечением лесоустроительных материалов и использованием беспилотных летательных аппаратов;</p>	<p>будут сопоставлены результаты нескольких технологий определения таксационных характеристик древостоев карбонового полигона, а также будут определены запасы древесины и дана оценка продуктивности насаждений в ходе полевых работ карбонового полигона (2023) с выходом на другие участки мониторинга региона (2024-2025)</p>	<p>1 квартал 2023 г. - 4 квартал 2025 г.</p>
7	<p>Выявление закономерностей изменения биомассы деревьев лесообразующих видов Евразии на основе сформированной базы данных</p>	<p>планируется к реализации метод пространственно-временного замещения, позволяющий определить, насколько изменится биомасса каждого древесного вида на территории Свердловской области при предполагаемом изменении температуры и годовых осадков</p>	<p>1 квартал 2023 г. - 4 квартал 2025 г.</p>
8	<p>Формирование массивов оценок фотосинтетической активности и дыхания растений аборигенной флоры в разных типах экосистем на полигоне и оценок фотосинтетической активности и</p>	<p>будет проведена оценка фотосинтетической активности отдельных видов растений и фитоценозов с целью прогнозирования секвестрационного потенциала экосистем, определен хлорофилльный</p>	<p>1 квартал 2023 г. - 4 квартал 2025 г.</p>

№	Наименование работы	Результат работы	Срок выполнения работ
	дыхания растений-интродуцентов с помощью портативных систем измерения фотосинтеза, дыхания и транспирации растений LiCor 6400 XT и Waltz GFS 3000	индекс основных групп растений, позволяющий на основе оригинальной методики, в комплексе с информацией о запасе древесины древостоя, высоте кронаобразующего слоя и длительности вегетационного периода, рассчитать значение фотосинтетического стока углерода за период вегетации карбонового полигона (2023) с выходом на другие участки мониторинга региона (2024-2025)	
9	Формирование массивов оценок емкости мобильных пулов углерода (гумус почв, мортмасса), содержания углерода и азота в компонентах наземной и подземной фитомассы травяно-кустарничкового яруса, подлеска, путем массового отбора образцов, а также выявление пространственно-временных особенностей их распределения; сравнительный анализ разных методов оценки содержания органического вещества (традиционного сжигания в хромовокислой среде и на анализаторе углерода и азота Multi N/C 2100)	на основе массовых аналитических данных будет уточняться и дополняться информация о количестве и распределении углерода в компонентах ландшафта участков карбонового полигона (2023) с выходом на другие участки мониторинга региона (2024-2025). Будут получены данные о соотношении углерода и азота в основных компонентах наземной и подземной фитомассы травяно-кустарничкового яруса, подлеска и органогенного слоя почвы с целью оценки устойчивости функционирования экосистем	1 квартал 2023 г. - 4 квартал 2025 г.
10	Формирование массивов оценок дыхания почвы и лесной подстилки, а также валежной древесины, с помощью полевых респирометров для определения объемов и ведущих факторов выделения углекислого газа почвами и мортмассой	будет продолжено формирование массивов данных по измерению дыхания биоты и почв и дана характеристика баланса стока и эмиссии CO <sub>2</sub> в разных типах сообществ карбонового полигона (2023) с выходом на другие участки мониторинга региона (2024-2025).	1 квартал 2023 г. - 4 квартал 2025 г.
11	Расчет корреляционных и регрессионных зависимостей: между погодными условиями и скоростью поглощения и эмиссии CO <sub>2</sub> ; между скоростью поглощения и эмиссии CO <sub>2</sub> ; между	будет получена система количественных зависимостей, описывающих согласованность скоростей эмиссии CO <sub>2</sub> из разных компонентов экосистем. Это позволит моделировать углерод-	1 квартал 2023 г. - 4 квартал 2025 г.

№	Наименование работы	Результат работы	Срок выполнения работ
	<p>скоростью эмиссии CO<sub>2</sub> из разных источников – почвы и валежа; между скоростью эмиссии CO<sub>2</sub> из одних и тех же источников в разных географических точках; между компонентами эмиссии CO<sub>2</sub> измеренных непосредственно и измеренных на основании дистанционных и интегральных методов, таких, как метод EddyCovariance</p>	<p>эмиссионную активность экосистем при наличии пропусков в массивах измерений и объективно оценивать надежность такого моделирования</p>	
12	<p>Выполнение интродукционных работ, привлечение новых видов и форм быстрорастущих высокопродуктивных растений, перспективных для целей организации карбоновых ферм</p>	<p>на основе полученных фенологических, физиологических, анатомических и иных данных, характеризующих депонирующий потенциал древесных и травянистых растений аборигенной флоры и интродуцентов, будет осуществлен подбор перспективных по секвестрационному потенциалу видов, сортов и генотипов растений и фактическое их использование на экспериментальных участках карбоновых ферм</p>	<p>1 квартал 2023 г. - 4 квартал 2025 г.</p>

**План разработки и внедрения новых образовательных программ Оператором карбонового полигона и его партнерами**

№	Мероприятие	Характеристики	Год разработки/внедрения
1	Адаптация существующих и разработка новых бакалаврских, магистерских и аспирантских программ (в том числе в области климатологии, экологии, биотехнологии, математического моделирования, экономики, юриспруденции) к задачам мониторинга климатически активных газов.	<p>Разработка новой образовательной магистерской программы <b>«Экологический менеджмент и технологии декарбонизации»</b></p> <p>Модернизация образовательной программы 06.03.01 «Биология» будет введен разработанный модуль <b>«Биологические аспекты климатических изменений»</b> объемом 6 зачетных единиц, 216 часов (4 курс), включающий 2 дисциплины: <b>«Мониторинг климата и климатическое регулирование»</b> и <b>«Экология фотосинтеза и дыхания биоты»</b>, разработана, готова к внедрению (40 часов)</p> <p>Внедрение новой дополнительной профессиональной образовательной программы повышения квалификации <b>«Основы обработки, анализа, моделирования и представления данных в программной статистической среде R»</b> (40 часов)</p>	2023-2024 гг.
2	План включения в существующие программы междисциплинарных курсов	<p>Внедрение модернизированной образовательной программы магистратуры <b>«Биоразнообразие в меняющемся мире»</b> с новыми междисциплинарными курсами <b>«Физика климата и окружающая среда»</b>, объем часов: 108 час 6 сем; <b>«Динамическая метеорология»</b>, объем часов: 108 час 7 сем и <b>«Космические методы исследования в метеорологии»</b>, объем часов: 108 час 8 семестр.</p>	2023-2024 гг.
3	Проведение выездных летних школ и мастер-классов, просветительских мероприятий для молодых ученых по направлениям: климатология, экология, биотехнологии, матмоделирование, экономика, юриспруденция	<p>Молодежные школы будут проведены на участках карбонового полигона: Коуровской астрономической обсерватории, учебно-опытном лесхозе, на биостанции УрФУ. Аудитория: школьники и учителя, студенты, преподаватели. На участках полигона в Уральском учебно-опытном лесхозе УГЛТУ, на биостанции УрФУ и в ботаническом саду УрФУ будут проводиться учебные практики со студентами по лесоводству и лесной таксации, биоразнообразию, функциональной экологии, экологической физиологии растений, грибов, почвенной биоты, почвоведению.</p>	2023-2025 гг.

**План научно-исследовательских работ по разработке технологических решений измерения и регулирования секвестрационного потенциала дополнительных площадок – «карбоновых ферм»: самозарастающих сельхозугодий, управляемых агрофитоценозов и рекультивируемых техногенно-нарушенных территорий (отвалов месторождений различного происхождения)**

№	Наименование работы	Содержание работы	Результат работы
1	Оценка устойчивости углероддепонирующих растений к техногенным факторам; выполнение работ на экспериментальных карбоновых фермах по оценке углероддепонирующего потенциала на дополнительных площадках карбонового полигона, являющихся экспериментальными для создания карбоновых ферм	будет выполнена оценка устойчивости растений с высоким секвестрационным потенциалом к техногенным факторам, в частности - к тяжелым металлам, для оценки их потенциальной пригодности к выращиванию на карбоновых фермах на промышленных отвалах	будут получены списки растений, рекомендуемых для выращивания на промышленных отвалах; будут получены данные углероддепонирующего потенциала на дополнительных площадках карбонового полигона, являющихся экспериментальными для создания карбоновых ферм
2	Выполнение работ на экспериментальных карбоновых фермах	выполнение прогнозных и экспериментальных исследований в рамках задач проекта на дополнительных, перспективных или опытных площадках в целях организации карбоновых ферм привлечение новых видов и форм быстрорастущих высокопродуктивных растений, перспективных для целей организации карбоновых ферм	будут получены данные углероддепонирующего потенциала на дополнительных площадках карбонового полигона, являющихся экспериментальными для создания карбоновых ферм
3	Оценка влияния декарбонизации и углеродного регулирования на деятельность промышленных предприятий Свердловской области.	будут оценены технологические, экономические, финансовые и иные последствия и риски процессов декарбонизации и климатического регулирования для промышленных	планируется разработка рекомендаций по использованию методик расчетной инвентаризации выбросов парниковых газов, составления углеродной отчетности и оценки углеродного

№	Наименование работы	Содержание работы	Результат работы
		организаций Свердловской области. На примере промышленной площадки одного из индустриальных партнеров проекта планируется выполнение расчетной инвентаризации прямых и косвенных выбросов парниковых газов, оценена готовность к проведению верификации и валидации углеродной отчетности аккредитованными организациями, даны рекомендации по сокращению выбросов парниковых газов	следа с учетом региональной специфики
4	Разработка и тестирование технологий секвестрации	будет продолжена работа по разработке и апробации разрабатываемых на карбоновом полигоне технологий секвестрации атмосферного углерода	будет дана общая оценка эффективности разрабатываемых технологий