



Карбоновые Полигоны
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

2022

СОДЕРЖАНИЕ

Пилотный проект мониторинга потоков климатически активных газов на территории России в контексте наблюдаемых и прогнозируемых изменений климата	2
Общая карта кластеризации биомов России для анализа репрезентативности наблюдательных площадок	10
Кластеризация биомов России для анализа репрезентативности наблюдательных площадок	12
Карта действующих и планируемых карбоновых полигонов при организациях Минобрнауки России	14
Ключевые результаты деятельности полигонов	16
Прототипы природно-климатических проектов	42
Результаты в цифрах	68
Образовательные программы, подготовленные карбоновыми полигонами	70
Отечественные образцы научного оборудования для карбоновых полигонов	70
Мероприятия карбоновых полигонов, запланированные на 2023 год	78
Карбоновые полигоны России	80

ПИЛОТНЫЙ ПРОЕКТ МОНИТОРИНГА ПОТОКОВ КЛИМАТИЧЕСКИ АКТИВНЫХ ГАЗОВ НА ТЕРРИТОРИИ РОССИИ В КОНТЕКСТЕ НАБЛЮДАЕМЫХ И ПРОГНОЗИРУЕМЫХ ИЗМЕНЕНИЙ КЛИМАТА

С.К.Гулев,
Н.Д.Дурманов,
А.П.Шашкин

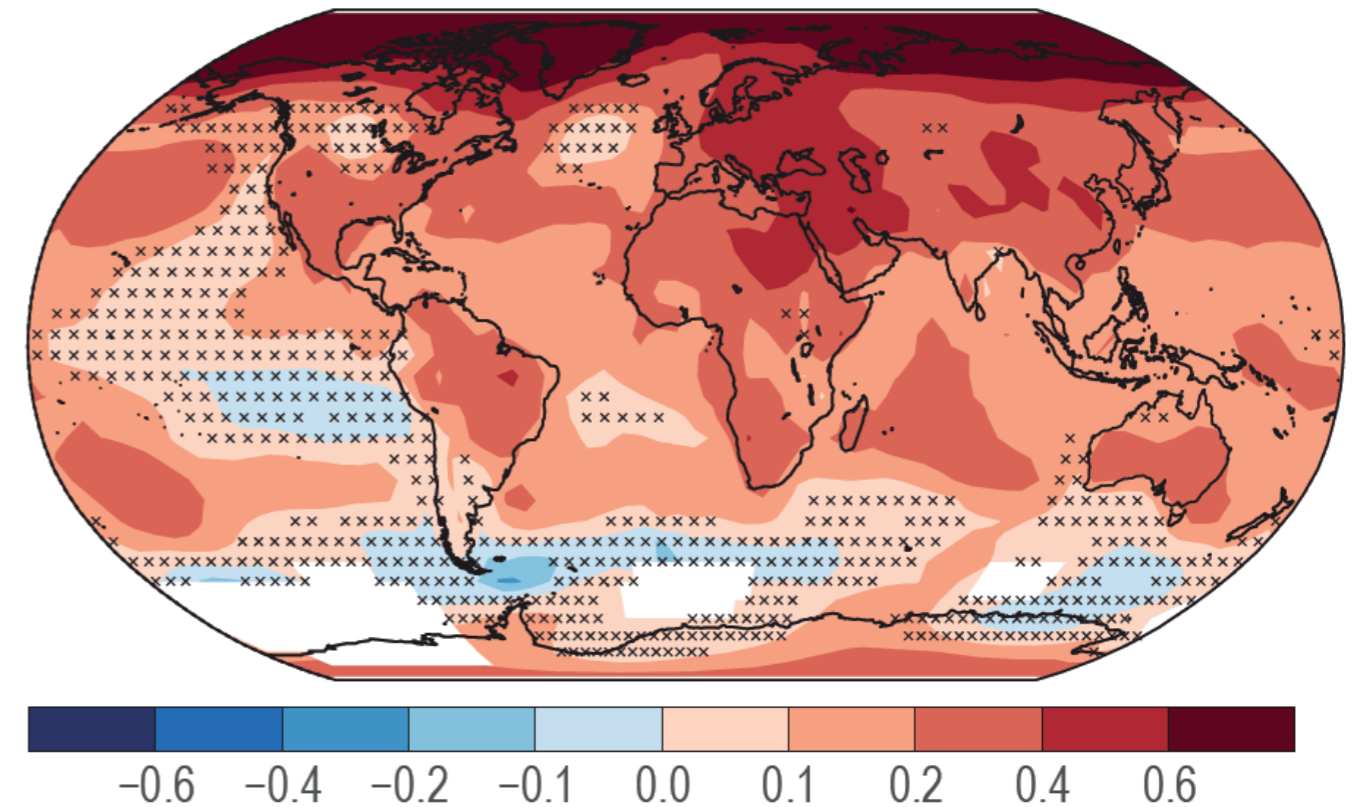
1 НАБЛЮДАЕМЫЕ КЛИМАТИЧЕСКИЕ ИЗМЕНЕНИЯ И РОЛЬ КЛИМАТИЧЕСКИ АКТИВНЫХ ГАЗОВ

Наблюдаемые сегодня климатические изменения на Земле являются беспрецедентными по интенсивности и скорости изменений ключевых климатических параметров, в первую очередь, приземной температуры. Этот вывод основан на заключениях всех оценочных докладов Межправительственной Группы Экспертов по Изменениям Климата (МГЭИК), включая последний, шестой оценочный доклад, выпущенный в 2021 году. Последнее десятилетие (2011–2020 гг.) стало самым теплым за всю историю инструментальных наблюдений. Более того, начиная с 1980-х годов каждое последующее десятилетие было теплее, чем любое предыдущее после 1850 года. Глобальная приземная температура в 2011–2020 гг. была на 1,1°C выше, чем в 1850–1900 гг., при этом потепление над сушей (1,59°C) было существенно сильнее, чем над океанами (0,88°C). Средние темпы глобального потепления в течение 1976–2020 гг. составили 0,18°C/10 лет в глобальном масштабе, и только за этот период глобальная температура выросла на

0,8°C. Важно, что особенно быстро температура повышалась в Северной полярной области, где, согласно оценкам Росгидромета, линейный рост среднегодовой температуры за 30 лет (1991–2020 гг.) составил около 2,64°C при трендах, достигающих более 0,7°C в десятилетие (рис. 1).

Эта неоднородность глобального потепления имеет критически важные последствия для территории России, где рост приземной температуры существенно превышает глобальный тренд. Согласно 3-му Оценочному Докладу об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации, выпущенному Росгидрометом в 2022 году, территория России теплеет еще почти вдвое быстрее, чем суша в целом: 0,51°C за десятилетие, причем каждое десятилетие с 1981–1990 гг. теплее предыдущего, а из 10 самых теплых лет 9 наблюдались в XXI веке.

Глобальное потепление приводит к критическим последствиям во всей Земной климатической систе-



× × × — статистически не значимые изменения

Рис. 1. Карта линейных трендов приземной температуры воздуха за период с 1981 по 2020 гг. (°C в десятилетие), представленная в 6-м Оценочном докладе МГЭИК.

ме. Потепление Мирового океана и происходящее из-за глобального потепления таяние ледников приводит к росту уровня океана примерно на 3 мм в год в течение последних 30 лет, то есть с начала 1990-х годов средний уровень моря поднялся примерно на 90 мм. В Северном Ледовитом океане продолжается уменьшение площади морского льда, наиболее интенсивное в сентябре, составившее в 2020 г. 13,1% за десятилетие относительно среднего показателя 1981–2010 гг. При этом Арктический морской лед становится в среднем моложе и тоньше.

Основной причиной наблюдаемых климатических изменений в течение последних 170 лет являются выбросы в атмосферу климатически активных газов, основными из которых являются двуокись углерода (CO₂), метан (CH₄) и закись азота (N₂O). Воздействие этих газов, которые называют хорошо перемешанными долгоживущими газами, связано с тем, что они препятствуют уходу длинноволновой солнечной радиации из климатиче-

ской системы. Дополнительный эффект также создают галогенные газы (CFCs, HCFCs, HFCs, PFCs, SF₆), влияние на климат которых несколько меньше. Источниками эмиссии климатически активных газов в атмосферу являются, во-первых, антропогенная деятельность человека, во-вторых, естественные источники, связанные с биогеохимическими процессами в Земной климатической системе. Антропогенное влияние на эмиссию климатически активных газов обеспечивается производством энергии, транспортом, сельским хозяйством, различными производствами, относительная роль которых в эмиссии может меняться от страны к стране, хотя главным источником эмиссии в большинстве стран является производство энергии. Еще одним способом антропогенного влияния на эмиссию климатически активных газов является изменение ландшафтов и практики землепользования. Атмосферные концентрации трех главных парниковых газов, выросли, начиная с доиндустриальной эпохи: CO₂ на 46%, CH₄ на 157% и N₂O на 22%.

2 ПРОГНОЗИРУЕМЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА

Определяющее влияние выбросов климатически активных газов на изменение средней глобальной температуры дает возможность прогнозирования климатических изменений на ближайшие десятилетия и столетие.

Такие прогнозы строятся на основании экспериментов с климатическими моделями, которые учитывают различные факторы климатических изменений, включая концентрации климатически активных газов, определяющих так называемые радиационные эквиваленты (effective radiative forcing). Для повышения достоверности прогнозов климата в настоящее время в рамках МГЭИК используется более 100 моделей Земной системы, которые различаются по конфигурациям, используемым пара-

метризациям и пространственно-временному разрешению. Для получения прогностических характеристик климата с каждой моделью, как правило, производится несколько экспериментов (до 10), отличающихся начальными условиями инициализации. Такой подход получил название ансамблевого подхода, позволяющего формировать несколько достаточно близких друг к другу решений, разброс которых также позволяет оценить неопределенности прогнозов, связанных с конфигурациями моделей. Помимо неопределенностей прогнозов, касающихся моделей, значительные неопределенности климатических перспектив связаны со сценариями выбросов, которые разрабатываются на основе экономических моделей, учитывающих развитие мировой эко-

номики, и прогнозируемые социально-экономические процессы. Сценарии, которые определяются как «Shared Socioeconomic Pathways» (SSPs), включают не только прогностические оценки выбросов климатически активных газов, но и прогностические оценки изменений практики землепользования и ряд других факторов (рис. 2 и 3).

Таким образом, прогностические оценки показывают, что антропогенные факторы, связанные с выбросами парниковых газов, могут привести к критическим изменениям как глобального климата, так и климатических условий на территории России, что существенно повлияет на все стороны жизни и экономики страны, включая сельское хозяйство, энергетику, качество жизни населения.

Рис. 2. 5 основных сценариев выбросов парниковых газов, для которых проводились климатические прогностические эксперименты в рамках 6-го оценочного доклада МГЭИК. Сценарии выражены в гигатоннах CO₂ в год. Сценарий SSP1-1.9 предполагает резкое сокращение выбросов до практически нулевых величин к 2050 году. Сценарий SSP5-8.5 предполагает агрессивное развитие экономики с выбросами, увеличивающимися до 2070 г., и их последующей стабилизацией.

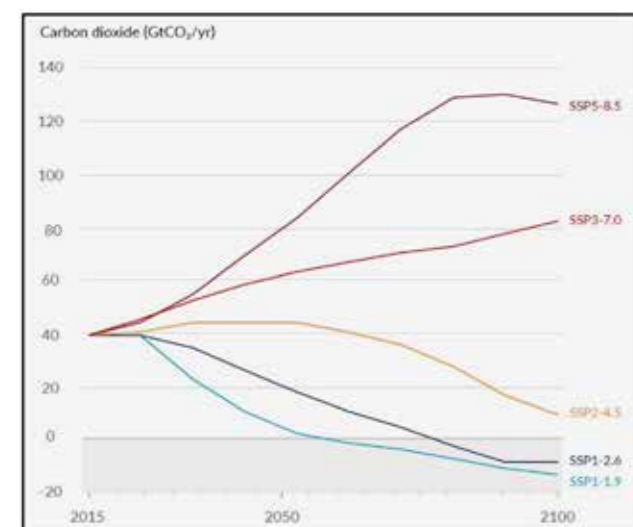


Рис. 3. Прогнозы роста глобальной температуры к 2050 г. в зависимости от сценария. Из этого графика следует, что даже при наиболее жестком сценарии SSP1-1.9 рост средней температуры Земли превысит 1.5 градуса, а возможно и 2 градуса.

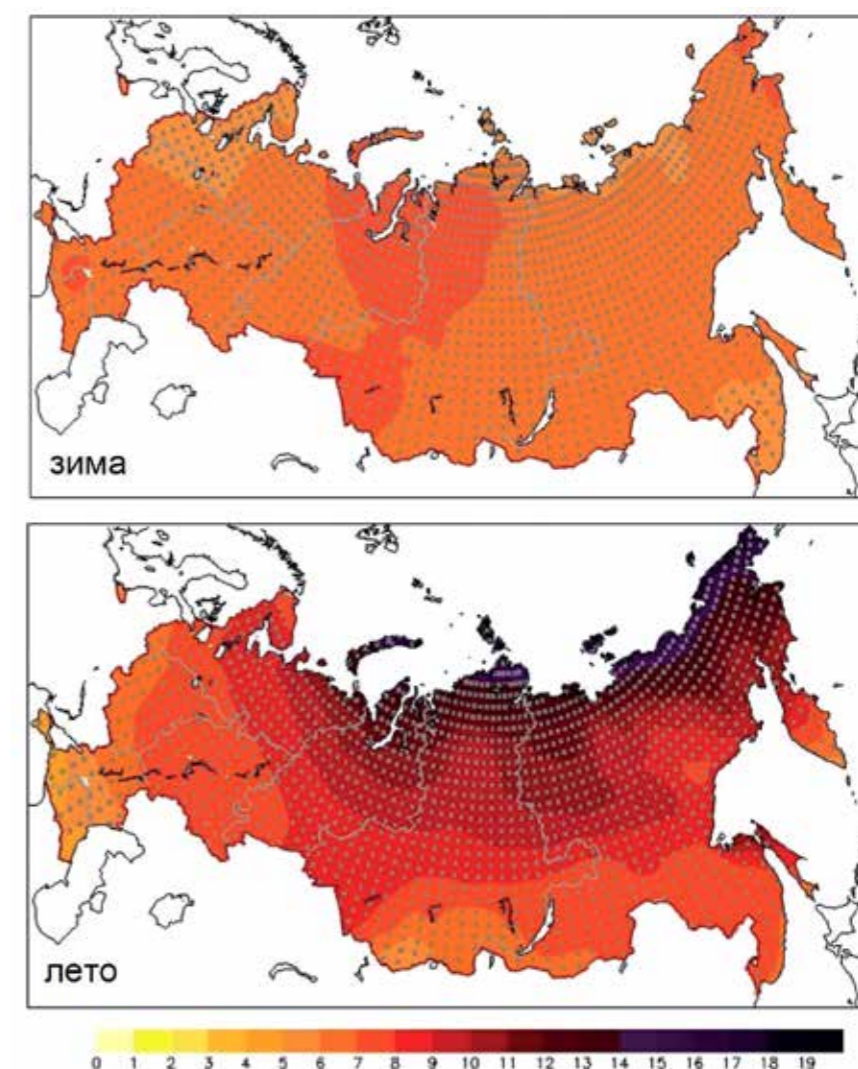
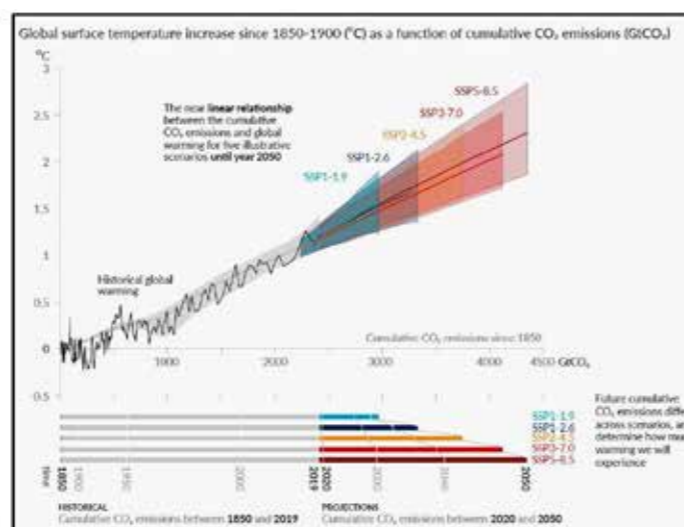


Рис. 4. Прогнозируемый рост приземной температуры воздуха на территории России в период 2081–2100 гг. в градусах Цельсия при реализации наиболее неблагоприятного сценария SSP5-8.5 для зимы (вверху) и для лета (внизу) по данным 3-го Оценочного Доклада Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации.

3 МЕЖДУНАРОДНЫЕ УСИЛИЯ ПО СМЯГЧЕНИЮ ГЛОБАЛЬНОГО ПОТЕПЛЕНИЯ

Учитывая отмеченные критические последствия глобального потепления, международное сообщество, начиная с 1990-х годов начало предпринимать усилия по уменьшению выбросов парниковых газов. Первой значительной вехой такой деятельности стал Киотский протокол, который был принят 11 декабря 1997 года, но, учитывая сложный процесс ратификации, вступил в силу 16 февраля 2005 года. В настоящее время Киотский протокол объединяет 192 Стороны.

Киотский протокол ввел в действие Рамочную конвенцию Организации Объединенных Наций об изменении климата, обязав промышленно развитые страны и страны с переходной экономикой ограничивать и сокращать выбросы парниковых газов в соответствии с согласованными индивидуальными целями. Киотский протокол определил перечень основных парниковых газов, обозначил цели по снижению выбросов для развитых государств и ввел механизмы по контролю за соблюдением обязательств. При этом Киотский протокол не был жестким документом, многие из его положений были рекомендательными, он устанавливал обязательные цели по сокращению выбросов для 37 промышленно развитых стран и стран с переходной экономикой, а также для Европейского Союза.

В целом, эти целевые показатели составляют среднее сокращение выбросов на 5% по сравнению с уровнями 1990 года за пятилетний период 2008–2012 годов (первый период действия обязательств). В 2012 году в Дохе (Катар) была принята Дохинская поправка к Киотскому

протоколу для второго периода действия обязательств, начинающегося в 2013 году и продолжающегося до 2020 года. Однако Киотский протокол не мог решить задач по достижению углеродной нейтральности в обозримом будущем, отчасти по причине рекомендательного характера большинства положений и отсутствия жесткого механизма контроля выполнения. Антропогенные выбросы и, соответственно, концентрации парниковых газов в атмосфере продолжали расти в период его действия.

Согласно Киотскому протоколу 12 декабря 2015 г. на основе Рамочной конвенции Организации Объединенных Наций об изменении климата было принято так называемое Парижское Соглашение, которое уже является юридически обязывающим международным договором об изменении климата. Соглашение было принято 196 Сторонами и вступило в силу 4 ноября 2016 г.

Цель Парижского соглашения - ограничить глобальное потепление уровнем 2 (а возможно 1,5) градуса Цельсия по сравнению с доиндустриальным уровнем. Для достижения этой цели страны-участники соглашения должны к середине века достичь климатической нейтральности в части выбросов парниковых газов. Парижское соглашение впервые юридически обязывает все страны осуществлять масштабные усилия по борьбе с изменением климата и адаптации к его последствиям. Недавняя конференция сторон в Глазго в 2021 году подтвердила основные цели Парижского соглашения и приняла ряд соглашений, детализирующих возможности его имплементации в разных странах.

Выполнение Парижского соглашения требует экономических и социальных преобразований, направленных на уменьшение выбросов парниковых газов и связанных с развитием новых методов получения энергии технологий уменьшения выбросов различными видами экономической деятельности, а также с применением технологий, позволяющих увеличивать поглощающую способность природных экосистем, в первую очередь, лесов и сельскохозяйственных угодий.

Для эффективного развития таких технологий требуются усилия, во-первых, по детальному мониторингу потоков климатически активных газов в различных экосистемах, поскольку, не имея высокоточных оценок базовых потоков парниковых газов, невозможно оценить эффективность тех или иных технологий, способствующих их поглощению. Имея такие оценки, можно начинать планировать развитие различных типов ландшафтно-ориентированных секвестрационных технологий, позволяющих обеспечить поглощение парниковых газов данными типами ландшафтов и таким образом усилить роль природных экосистем в формировании поглощения парниковых газов из атмосферы.

Возвращаясь к рассмотренным выше сценариям выбросов (рис. 2 и 3), в 6-м Оценочном докладе МГЭИК было показано (рис. 5), что при реализации сценария SSP5-8.5 экосистемы суши и океана могут «справиться» только с 38% выбросов парниковых газов в атмосферу. При реализации сценария SSP1-1.9 эта величина составляет 70%. То есть для достижения углеродной

нейтральности 62% выбросов в первом случае и 30% во втором должны быть утилизированы как применением новых промышленных технологий, так и внедрением экосистемных технологий. Учитывая практическую невозможность реализации в полном объеме сценария SSP1-1.9, мы должны ориентироваться, по крайней мере, на сценарии SSP1-2.6 или SSP2-4.5, предполагающие необходимость утилизации промышленными и экосистемными технологиями соответственно 35% и 46% выбросов парниковых газов.

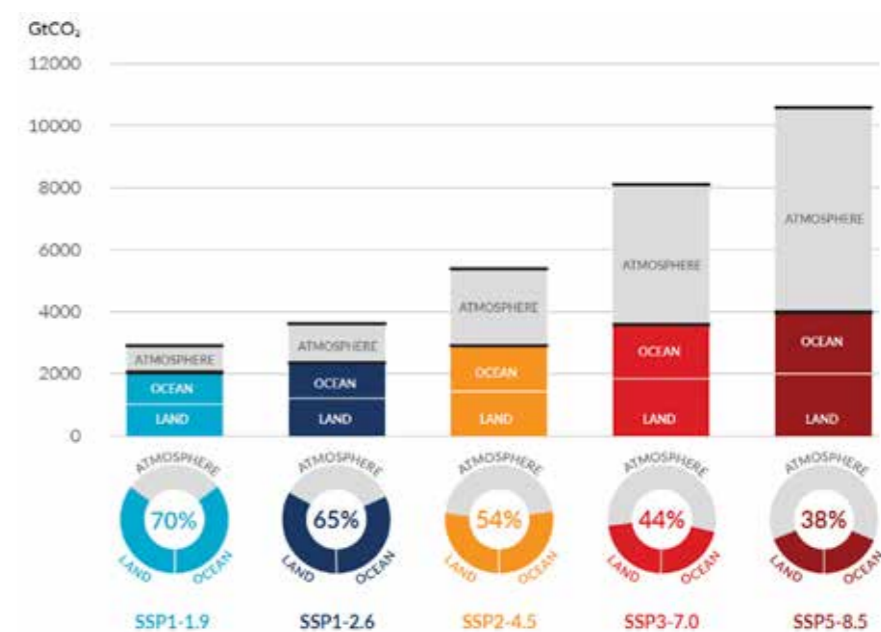


Рис. 5. Общие совокупные выбросы CO₂ (гигатонны), поглощенные сушей и океанами (показаны цветом) и остающиеся в атмосфере (серый цвет) в случае реализации пяти сценариев выбросов по оценкам на 2100 г. По материалам 6-го оценочного доклада МГЭИК.

4 ПИЛОТНЫЙ ПРОЕКТ МИНИСТЕРСТВА НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ ПО МОНИТОРИНГУ ПОТОКОВ КЛИМАТИЧЕСКИ АКТИВНЫХ ГАЗОВ НА ТЕРРИТОРИИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

На решение задач оценки баланса потоков парниковых газов для различных экосистем России и развития технологий, направленных на секвестрацию парниковых газов, направлен пилотный проект Министерства науки и высшего образования Российской Федерации.

Главным показателем при оценке роли отдельных стран в эмиссии газов станет чистая эмиссия (то есть разность между эмиссией и поглощением). Таким образом, оценка (инвентаризация) чистой эмиссии климатически активных газов каждой страной становится проблемой достоверного количественного учета антропогенных и природных источников газов, с одной стороны, и природных (или созданных человеком) поглотителей этих газов, с другой. В современных условиях это делает проблему не только чисто научной и экологически значимой, но и политико-экономической, поскольку инвентаризация как эмиссий, так и секвестирования парниковых газов становится предметом доверия международного сообщества к национальным системам мониторинга климатически активных газов. При отсутствии (по крайней мере, в настоящее время) четко выработанных стандартов измерений и расчета эмиссий и секвестирования, инвентаризация климатически активных газов на уровне стран может стать областью политико-экономических спекуляций. Другими словами, отсутствие международно признанных технологий инвентаризации и мониторинга газов в стране приведет к необходимости принятия «на веру» оценок, основанных на существующих технологиях спутникового мониторинга, проверка которых будет

невозможна или крайне затруднительна, а также на не вполне точных моделях с не всегда обоснованной аппроксимацией на большие территории. Это приведет к тому, что позиция России при обсуждении финансовых и экономических проблем, связанных с реализацией международных соглашений и ожидаемым внедрением трансграничного углеродного регулирования товаропотоков, будет слабой и плохо обоснованной, что грозит существенными финансовыми потерями для страны (по различным оценкам, исчисляемыми от 4 до 24 млрд. долларов в год).

Для решения задачи построения эффективной системы мониторинга климатически активных газов и её обеспечения эффективными технологиями и методиками на территории России Министерство науки и высшего образования Российской Федерации в 2021 году начало реализовывать проект создания сети научно-образовательных полигонов для разработки, испытания и валидации технологий количественной оценки потенциалов эмиссии и секвестирования различными типами экосистем. Стратегическая цель пилотного проекта – оценить потенциал российских экосистем в части обеспечения секвестрации климатически активных газов. При этом проект будет решать несколько задач. Во-первых, это получение достоверных интегральных оценок потоков основных парниковых газов по территории России и отдельным типам ландшафтов, что принципиально для международной отчетности. Во-вторых, это оценка потенциала различных типов ландшафтов в части поглощения парниковых газов.

И, наконец, в-третьих, это апробация секвестрационных технологий, наиболее эффективных в различных ландшафтных условиях, и создание дорожной карты для реализации климатических проектов в природных экосистемах России.

В рамках пилотного проекта начато создание измерительных полигонов в различных природных системах, являющихся как эмитентами газов, так и их поглотителями. Такими районами являются различные типы лесов, болота, вечная мерзлота, прибрежные акватории, районы активного сельскохозяйственного производства. На каждом из полигонов обеспечиваются прецизионные измерения потоков основных климатически активных газов, а также потоков тепла и влаги на основе пульсационных и камерных методов, а также прямой эмиссии с поверхности почвы. Такие измерения обеспечиваются сетью наземных сенсоров, а также дистанционными наблюдениями с использованием беспилотных летательных аппаратов, оснащенных необходимым набором сенсорной аппаратуры – мультиспектральными камерами, радарами, лидарами и пр. Состав и конфигурирование измерительных средств зависит от характеристик самого полигона. Занимая по площади относительно небольшие территории, в сумме составляющие несколько сотых процента территории России, но будучи репрезентативными для типов ландшафтов, составляющих проценты и десятки процентов от территории России, полигоны сформируют эффективную наблюдательную сеть, которая позволит решать задачи, обозначенные выше.

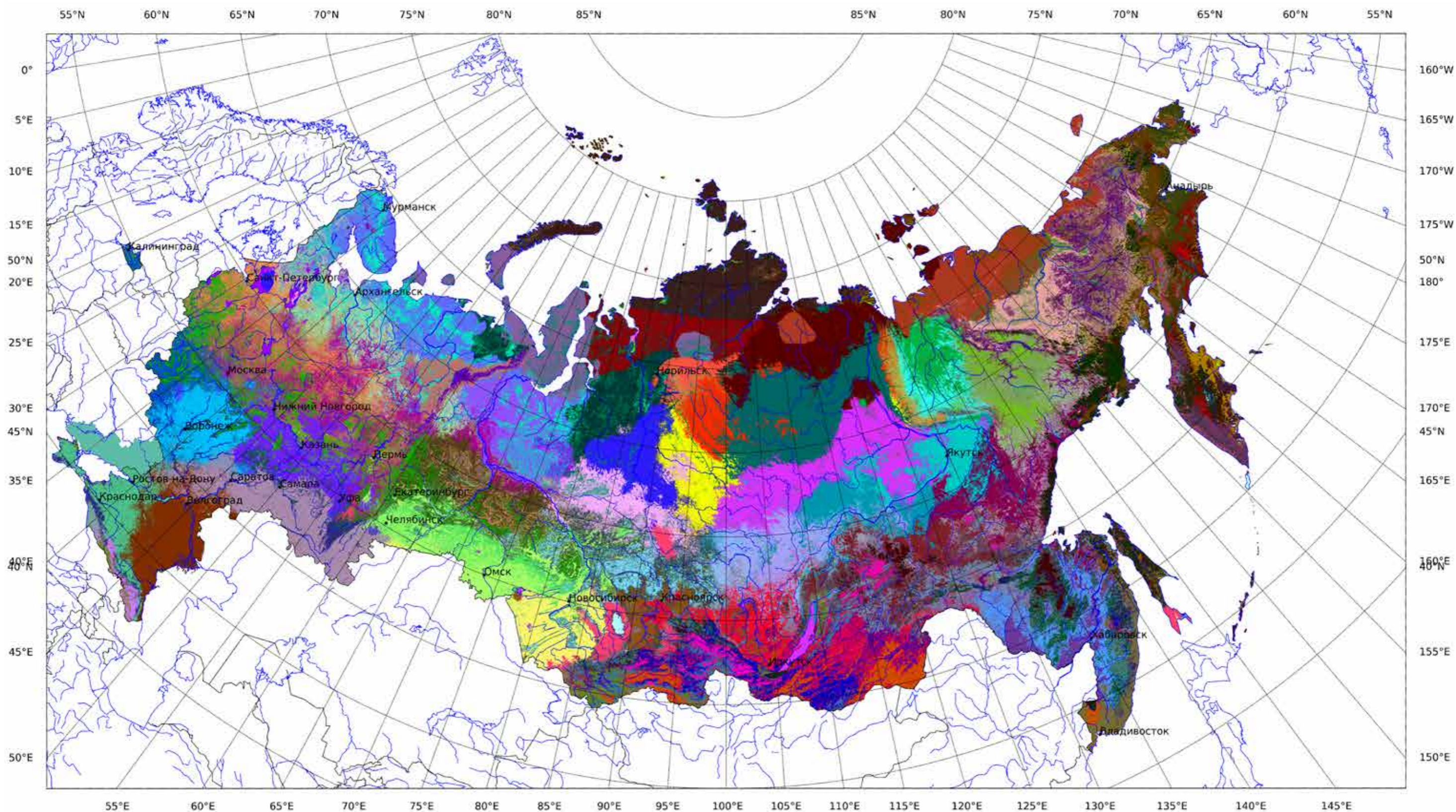
Проводимые на полигонах наблюдения будут интегрированы в международные наблюдательные и исследовательские программы, включая EU-Copernicus CO2 Human Emissions project (CHE), FLUXnet, Advanced Global Atmospheric Gases Experiment (AGAGE), WMO Global Atmospheric Watch (WMO-GAW), Global Climate Observing System (GCOS) и другие.

Впоследствии полигоны станут не только площадками мониторинга, но и начнут реализовывать возможности экспериментального изменения ландшафта с целью оценки эффективности потенциала поглощения различных типов экосистем. Такие экспериментальные работы могут включать высевание сильно секвеструющих культур, изменение типа почв, исследование потенциала марикультуры с целью оценки ее секвестрационного потенциала и другие технологии. Наиболее успешные из них впоследствии станут климатическими проектами, развиваемыми индустриальными партнерами полигонов. Полная оценка результатов работы системы мониторинга с помощью полигонов станет возможна через десятилетие, хотя многие ключевые оценки появятся и будут использоваться через 3-4 года.

Будучи научно-образовательными структурами, полигоны также служат созданию нового уровня кадрового потенциала для развития и поддержания системы мониторинга климата. Задача мониторинга климатически активных газов – междисциплинарная и требует привлечения специалистов в самых разных областях: климатология, метеорология и океанография, численное моделирование, технология измерений,

машинное обучение, и т.д. Это потребовало совместных усилий ведущих университетов и научных институтов для создания новых образовательных форматов, связанных с самими полигонами, для адаптации существующих и разработки новых магистерских и аспирантских программ, консолидирующих знания из разных областей.

ОБЩАЯ КАРТА КЛАСТЕРИЗАЦИИ БИОМОВ РОССИИ ДЛЯ АНАЛИЗА РЕПРЕЗЕНТАТИВНОСТИ НАБЛЮДАТЕЛЬНЫХ ПЛОЩАДОК



КЛАСТЕРИЗАЦИЯ БИОМОВ РОССИИ ДЛЯ АНАЛИЗА РЕПРЕЗЕНТАТИВНОСТИ НАБЛЮДАТЕЛЬНЫХ ПЛОЩАДОК

Получение о пространственном распределении потоков парниковых газов и, в конечном итоге, интегральных оценок потоков и составляющих углеродного баланса России невозможно без детального учета ландшафтной неоднородности территории страны. Для получения интегральных оценок потоков с использованием точечных данных измерений требуется развитие методологии пространственной интерполяции данных на основе комплекса факторов, учитывающих региональные климатические условия, структуру и видовой состав растительности, топографию местности, и многие другие факторы.

Современная сеть станций мониторинга потоков парниковых газов в России пока достаточно редкая, что не позволяет использовать обычные статистические методы для интерполяции точечных данных наблюдений. Измеряемые потоки репрезентативны большей частью лишь для крайне небольшой площади вблизи измерительной вышки, в связи с чем встает сложнейшая задача масштабирования данных на более крупные территории и их дальнейшей интерполяции с использованием нелинейных моделей с набором параметров, описывающих климатические и геоморфологические условия, структуру почвенного и растительного покрова.

Сложные модели с большим количеством входных переменных обычно накапливают ошибки определения параметров и исходных данных, что приводит к тому, что накопленная ошибка может значительно превышать эффект от учета особенностей моделируемых нелинейных процессов. Упрощение задач по интерполя-

ции пространственных данных, расчету параметров функционирования экосистем, и, в итоге, по расчету потоков углерода можно достигнуть за счет построения региональных линейных моделей. Операционной единицей моделирования в этом случае может служить экорегион, объединяющий территорию с одинаковыми климатическими условиями, сходными параметрами рельефа, почвенными характеристиками и свойствами растительного покрова.

Для формализации процесса выделения экорегионов в исследовании были применены методы статистического моделирования. Набор переменных, характеризующих рельеф, климат, структуру, состояние почвы и растительности и параметры вегетации приведены в таблице.

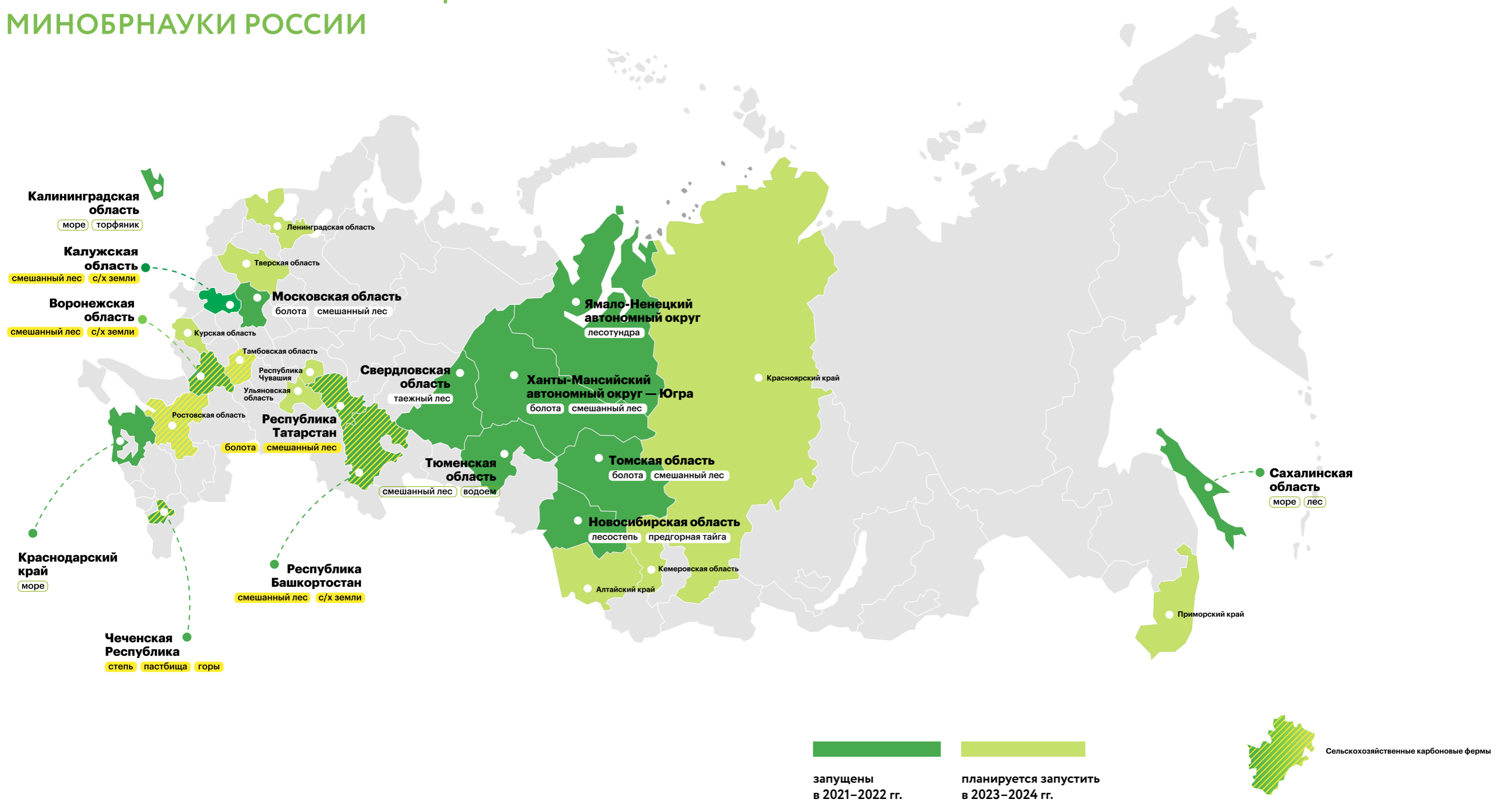
Далее матричные данные о различных параметрах экосистем подвергались процедуре кластеризации, основанной на методе К-средних (K-means). Данный алгоритм позволяет идентифицировать кластеры или центроиды (характеризующие центры кластеров), относя каждую точку данных к ближайшему кластеру, сохраняя при этом характеристики центроидов. Эта задача решается итерационно с оптимизацией по различным статистическим параметрам. Каждый кластер характеризуется минимальной дисперсией значений по выбранным переменным и в нашем случае, таким образом, может быть рассмотрен как уникальный физико-географический регион. Кластеры в нашем исследовании представляют типы репрезентативных ландшафтов для обоснования размещения станций сети карбоновых полигонов. Каждый выделенный

класс характеризуется однородным (по отношению к формированию потоков климатически активных газов) ландшафтом.

Проведенное районирование позволяет заключить, что существующие 15 полигонов являются репрезентативными для ландшафтов, занимающих по площади 392,800,000 га. Это составляет примерно 23.1% территории России (~17,000,000 км²). Суммарная площадь самих 15 полигонов равна около 40000 га, что составляет 0.002% территории России, то есть ведя исследования на 0.002% территории мы получаем оценки, которые репрезентативны для 23.1% территории. Можно также провести некоторые уточняющие оценки. Так, вечные снега/ледники на территории России занимают 6,400,000 га, водные объекты (без болот), для которых оценки должны выполняться отдельно, составляют 63,000,000 га. Тогда скорректированная оценка показывает, что действующие 15 полигонов репрезентативны для 24.4% территории России.

Данные	Исходное разрешение	Источник
Данные по рельефу поверхности		
Абсолютные высоты, м Крутизна склонов	0,00083° или 3" (~ 90 м на экваторе)	MERIT DEM http://hydro.iis.u-tokyo.ac.jp/
Климатические данные		
Средние месячные значения солнечной радиации, МДж	0,0083° или 30" (~900 м)	WorldClim 2.1 https://worldclim.org
Средние месячные значения температуры, °C Средние месячные значения осадков, мм		CHELSA Bioclim V2.1 https://chelsa-climate.org/bioclim
Данные о растительности и ландшафтном покрове		
Спектральные вегетационные индексы NDVI (2017-2021): 10 сроков за вегетационный период (23 апреля – 14 сентября) 2 срока за зимний период (17 января и 2 февраля)	250 м	MODIS https://lpdaac.usgs.gov/
Карта растительности (ландшафтного покрова) на территорию России	250 м	ИКИ РАН http://pro-vega.ru/
Почвенные данные		
Запасы углерода в верхних 30 см на м ² Объемный вес почв кг/м ³	250 м	ISRIC SoilGrids https://soilgrids.org

КАРТА ДЕЙСТВУЮЩИХ И ПЛАНИРУЕМЫХ КАРБОНОВЫХ ПОЛИГОНОВ ПРИ ОРГАНИЗАЦИЯХ МИНОБРНАУКИ РОССИИ



**КЛЮЧЕВЫЕ
РЕЗУЛЬТАТЫ
ДЕЯТЕЛЬНОСТИ
ПОЛИГОНОВ**



Карбоновые Полигоны
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

КЛЮЧЕВЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ ПОЛИГОНА

КАРБОНОВЫЙ ПОЛИГОН «WAY CARBON»

Чеченская республика
Чеченский государственный университет
им. А.А. Кадырова

Карбонный полигон ЧГУ – единственный, где проводятся научные исследования по разработке технологий регенеративного животноводства в горных и предгорных районах. Регенеративное управление выпасом, в частности, адаптивный выпас с несколькими пастбищами снижает деградацию почв по сравнению с непрерывным выпасом, и, таким образом, имеет потенциал уменьшения выбросов углерода из почвы. Сочетание севооборота и поддержание многолетних покровных культур с управляемым выпасом также способствуют накоплению органического углерода в почве.

Эта задача решается в рамках реализации проекта по созданию инструмента управления пастбищным хозяйством. Для эффективного достижения поставленных целей университет активно взаимодействует с коллективами, которые владеют компетенциями по климатической и карбонной тематике – Российский университет дружбы народов, Воронежский государственный лесотехнический

университет имени Г.Ф. Морозова, Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», Институт географии РАН, Институт глобального климата и экологии имени академика Ю.А. Израила.

Проект направлен на определение наиболее эффективных методик регенеративного животноводства, позволяющих повысить секвестрацию углерода пастбищами, и изучения воздействия климата на экосистемы горных и предгорных ландшафтов. В основе разрабатываемого сервиса лежит создание цифровой модели пастбищного участка, которая позволит анализировать состояние пастбищ на предмет их возможной деградации и количественной оценки объема производимой кормовой базы, нарушений почвенного и травяного покрова, наличия участков ветровой и водной эрозии и зон засоления. На каждом участке (эталонный участок, интенсивный выпас, выпас) проводится отбор наземной травянистой раститель-

ности для оценки объема и качества биомассы. Обобщены доминирующие виды растений для каждой экосистемы. В общей сложности на южном склоне Макажойской котловины выявлено 62 вида сосудистых растений, принадлежащих 31 семействам.

В рамках реализации проекта была программно реализована математическая модель, учитывающая механизмы физической стабилизации почвенного органического вещества. В настоящее время проводится параметрическая идентификация данной модели на тестовых площадках регенеративного животноводства.

Результатом проекта станет восстановление качества почвы и повышение содержания почвенного углерода, повышение рентабельности производства за счет увеличения плотности поголовья скота на тех же площадях и снижение себестоимости продукции за счёт естественного восстановления пастбищ.



Полевые исследования по изучению разнообразия растительных сообществ, почв, гидрогеологических и погодных условий, сконцентрированных на компактной территории Макажойской котловины карбонного полигона ЧГУ



КЛЮЧЕВЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ ПОЛИГОНА

КАРБОНОВЫЙ ПОЛИГОН «WAY CARBON»

Чеченская республика
Грозненский государственный нефтяной
технический университет имени академика
М.Д. Миллионщикова

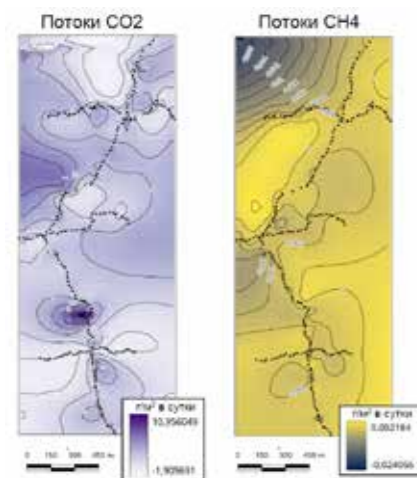
Начиная с мая 2022 года на тестовых участках карбонового полигона ГГНТУ имени акад. М.Д. Миллионщикова производятся регулярные наблюдения потоков климатически активных газов с применением методов ковариаций и камерные измерения. В работах используется портативная фотосинтетическая система для измерения фотосинтеза и дыхания элементов растительности LI-6800, а также мобильная система на основе анализатора закрытого типа G4301 (Picarro – США). Одновременно ведутся мультиспектральные съемки с использованием беспилотных летательных аппаратов.

Проведенными измерениями удалось получить долговременные ряды потоков двуокиси углерода, метана и закиси азота за 5 месяцев и установить характеристики их сезонной и короткопериодной изменчивости. Так, сезонные изменения CO_2 составляют до 4 г/м^2 в сутки и по амплитуде превышают короткопериодную из-

менчивость. Потоки метана при этом демонстрировали достаточно сильные вариации на короткопериодном масштабе (до 0.1 г м^2 в сутки) при практически не выраженных более длительных колебаниях, связанных с сезонным ходом. Интегральные оценки, полученные для одного из участков («Ферма») показали магнитуды межмесячной изменчивости, связанной с сезонными изменениями до 300 ммоль/м^2 в сутки. На участке «Рошни-Чу» проведены исследования почвенного дыхания с использованием мобильной системы на основе анализатора закрытого типа G4301. Это позволило построить карты потоков CO_2 и CH_4 с поверхности почвы и выявить достаточно сильную пространственную изменчивость потоков двуокиси и метана, значительно превышающую средние величины по участку.

На полигоне также выполнены исследования параметров фотосинтеза основных эдификаторов и субэди-

фикаторов предгорных широколиственных лесов с использованием портативной фотосинтетической системы для измерения фотосинтеза и дыхания элементов растительности LI-6800 (в комплекте с источником освещения, рабочей камерой $3 \times 3 \text{ см}$ и аксессуарами) (LI-COR, США). Проведенные эксперименты показали существенные межвидовые различия параметров фотосинтеза пяти лиственных видов (дуб, бук, граб, лещина, грецкий орех) древесных растений, произрастающих под пологом зрелым древостоем в зоне широколиственных лесов предгорных районов Северного Кавказа. Полученные результаты являются основой для количественных оценок межвидовых различий $\text{CO}_2/\text{H}_2\text{O}$ -газообмена древесных растений региона в вегетационной динамике, при разных экологических условиях, у деревьев разного возраста.



Карты потоков CO_2 (слева) и CH_4 (справа), полученные по результатам проведенных измерений почвенного дыхания с использованием мобильной системы на участке «Рошни-Чу»



КЛЮЧЕВЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ ПОЛИГОНА

ЕВРАЗИЙСКИЙ КАРБОНОВЫЙ ПОЛИГОН

Республика Башкортостан
Уфимский государственный
нефтяной технический университет

К числу экосистем, наиболее эффективно депонирующих углерод, относятся зарастающие лесом залежи на месте неиспользуемых сельскохозяйственных земель. В Башкортостане с 1990 по 2020 гг. размеры посевных площадей в лесных и лесостепных зонах сократились почти на 35%. Участок карбонового полигона «Мишкино» заложен на залежных землях в пределах широколиственно-лесной зоны республики, где в составе древостоя доминирует быстрорастущий вид – береза повислая (*Betula pendula*) с преобладающим возрастом древостоя 10-22 года.

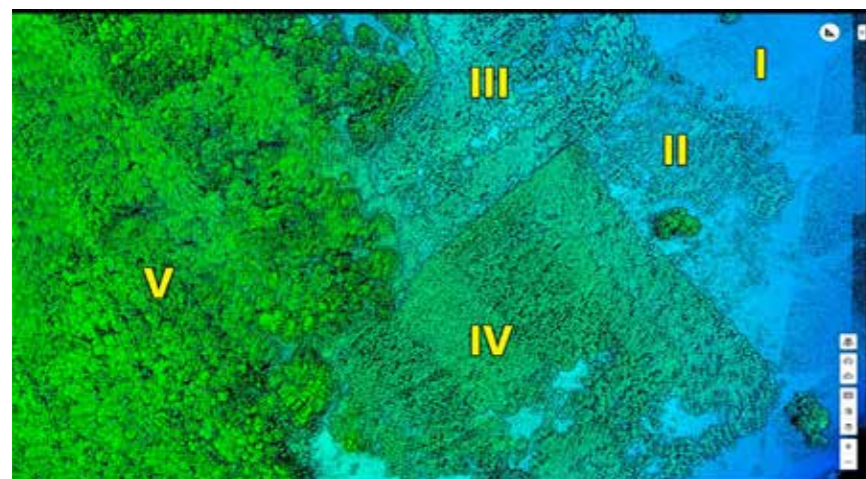
Для анализа объемов депонирования углерода растительностью и почвой на полигоне заложены 36 пробных площадок, различающихся по возрасту и полноте древостоя. Отобраны 1300 образцов растительности и почвы для анализа динамики депонирования углерода в ходе

лесовосстановительной сукцессии. Выполнен анализ биоразнообразия растительности, разработана флористическая классификация стадий восстановительных сукцессий в соответствии с подходом Браун-Бланке. Для анализа продуктивности травянистой растительности использован метод укосов (на площадках 1x1 м), а для древесной растительности – комплекс лесотаксационных характеристик (высота и возраст древостоя, диаметр стволов) и метод модельных деревьев с определением массы стволовой древесины, веток и листьев. Для анализа фитомассы корневых систем отобраны монолиты почвы до глубины наибольшего проникновения корневых систем (до 50-60 см).

Предварительные оценки показывают, что депонирование углерода на всем участке «Мишкино» размером 10x10 км может составить от 20000 до 35000 тонн

в год, ожидаемый экономический эффект в ценах 2021 года может составить от 1 000 000 до 1 750 000 €. Для определения продуктивности древостоя был использован комплекс наземных методов, а также съемки с БПЛА с мультиспектральной и лидарной камерами. Последняя обеспечивала определение высоты древесных видов с точностью до 2-5 см.

Проводимые исследования на участке карбонового полигона «Мишкино» позволят в ближайшее время перейти к созданию первой на территории Республики Башкортостан карбоновой фермы, где будут отработаны методы повышения секвестрационного потенциала растительности с использованием агрохимических и лесотехнических мероприятий, что в перспективе позволит создавать рентабельные карбоновые фермы.



Стадии зарастания березой на неиспользуемых пахотных землях, полученные в результате лидарной съемки с БПЛА
I – первая стадия зарастания (возраст 2-5 лет)
II – вторая стадия зарастания (возраст 7-10 лет)



Вылет дрона Matrice 300 RTK с лидарной камерой на сканирование участка карбонового полигона

КЛЮЧЕВЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ ПОЛИГОНА

КАРБОНОВЫЙ ПОЛИГОН «ГЕЛЕНДЖИК»

Краснодарский край
Институт океанологии
Российской академии наук

Исследования потоков CO_2 и CH_4 с поверхности почвы на наземном участке карбонового полигона «Геленджик» проводились в летний сезон 2022 года. Для проведения измерений участок был разделен на 16 участков с однородной растительностью и почвенным покровом, равномерно распределенными в пределах полигона. Измерения проводились как в дневное время, так и в вечернее время при различных погодных условиях

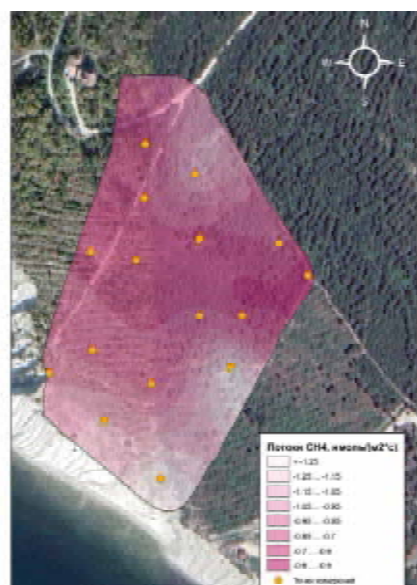
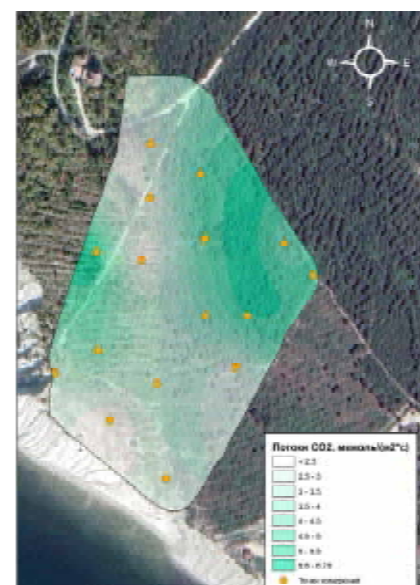
Анализ результатов измерений потоков CO_2 и CH_4 с поверхности почвы на полигоне показал высокую пространственную и временную изменчивость, определяемую совокупностью абиотических и биотических факторов и в том числе температуры воздуха и почвы, почвенного увлажнения, гранулометрического состава и запаса углерода в почве, видового состава и структуры растительности, ее функционального состояния, типа

и др. На различных участках полигона эмиссия CO_2 с поверхности почвы изменялась от 2 до 6,15 мкмоль/ $\text{м}^2\text{с}$. Максимальные значения эмиссии были выявлены в северо-восточной и западной частях полигона, что было связано с существенным вкладом автотрофного дыхания корней древесной растительности. Минимальные значения эмиссии CO_2 (менее 2,5 мкмоль/ $\text{м}^2\text{с}$) наблюдались на участках с травянистой и кустарниковой растительностью в южной части полигона на фоне низкого почвенного увлажнения

Анализ пространственной изменчивости потоков метана также показал значительную неоднородность потоков, определяемую погодными условиями, аэрацией и микробными процессами, запасами органического вещества в почве, структурой растительности, температурой и влажностью почвы. На всем исследуемом

участке карбонового полигона наблюдалось поглощение CH_4 из атмосферы. Значения потока CH_4 в среднем варьировали от 0,5 до 1,25 нмоль/ $\text{м}^2\text{с}$. Минимальные скорости поглощения метана наблюдались на северо-восточной и северо-западной частях полигона. В южной части полигона поглощение метана почвенным покровом увеличивалось и достигало в среднем 1,25 нмоль/ $\text{м}^2\text{с}$

Анализ суточной изменчивости CO_2 и CH_4 оказал максимальные скорости эмиссии CO_2 в послеполуденное время, а максимальные скорости поглощения (окисления) метана в почве в утренние часы. Отмечается статистически значимый рост эмиссии CO_2 с поверхности почвы в диапазоне до 30°C и его сокращение по мере дальнейшего роста температуры. Выявлен устойчивый рост эмиссии CO_2 с увеличением влажности и запасов углерода почвы. Скорость поглощения



ландшафт карбонового полигона, вид с моря

замеры потоков солнечной радиации плавающим радиометром



CH_4 из атмосферы увеличивалась с уменьшением влажности и увеличением температуры почвы

На морском участке полигона были проведены исследования углеродного баланса прибрежных вод и роли фитопланктонных сообществ в его формировании. Всего за 2022 год организовано 4 экспедиции в прибрежной зоне. Помимо измерений потоков CO_2 над поверхностью прибрежных вод в рамках деятельности морской части карбонового полигона в 2022 году был проведен отбор проб фитопланктона с повышенной частотой. В динамике фитопланктона выявлены основные адаптационные стратегии, которые определяют смену морфотипов при изменении светового режима. В частности, было исследовано влияние структурно-функциональной организации фитопланктона на функционирование морского углеродного насоса и показано, что фактически

природный углеродный насос состоит из 2 компонентов: органического и карбонатного насосов, причем за первый ответственны в основном диатомовые водоросли, за второй – кокколитофориды. Структура фитопланктонного сообщества и, прежде всего, система кокколитофориды-диатомовые определяет работу биологической помпы. Органический насос выводит углерод из цикла ненадолго, а второй (карбонатный) – на длительные периоды, что крайне перспективно для развития технологий секвестрации

Эти работы позволили обнаружить совершенно новый механизм поглощения углерода в воде, связанный с тем, что адаптированные к свету невысокой интенсивности микроводоросли (например, в области сезонного термоклина) оказываются подвержены флуктуирующему освещению с периодами экстре-

мально высоких для них значений. Повреждения чрезмерным светом могут приводить к снижению скорости фотосинтеза и даже гибели клеток с последующей заменой на другие, более адаптированные виды. Это позволило начать разработку методики эксперимента «Мезокосм», направленного на оценку перспективности секвестрации углерода фитопланктоном в прибрежной области моря. Была разработана и создана погружаемая платформа, на которую устанавливаются аквариумы с экспериментальными биосредами, которые могут погружаться на различные горизонты с разным уровнем освещенности. Такая система станет прототипом потенциально эффективной секвестрационной технологии. В течение 2022 года проводились тестовые эксперименты с несколькими опускающимися аквариумами. На ноябрь 2022 г. намечена активная фаза испытательного эксперимента.

обработка проб фитопланктона на оптическом микроскопе



Сахалинская область
Сахалинский государственный университет

На Сахалинском карбоновом полигоне проводятся работы по оценке возможностей секвестрации углерода в прибрежных биоморфолитосистемах в береговой области залива Анива. Для надежной количественной оценки потоков и понимания факторов, вызывающих изменчивость потоков парниковых газов в прибрежно-морских экосистемах, необходимы исследования областей с повышенной интенсивностью органогенного осадконакопления. Целью работ, проводимых на полигоне, является определение геоморфологической позиции и динамики маршей и илистых осушек Сахалинского карбонового полигона, а также оценка содержания органического углерода в этих климатоформирующих компонентах биоморфолитосистем. Район исследования расположен в бухте Лососей, северной части зал. Анива, который является эстуарной зоной рек Цунай и Суся. Марши, сформированные в этой дельтовой системе, состоят из олигогалинных водно-болотных угодий из-за сбросов пресной воды через сеть каналов дельты. Были выполнены анализы донных отложений из колонок и разре-

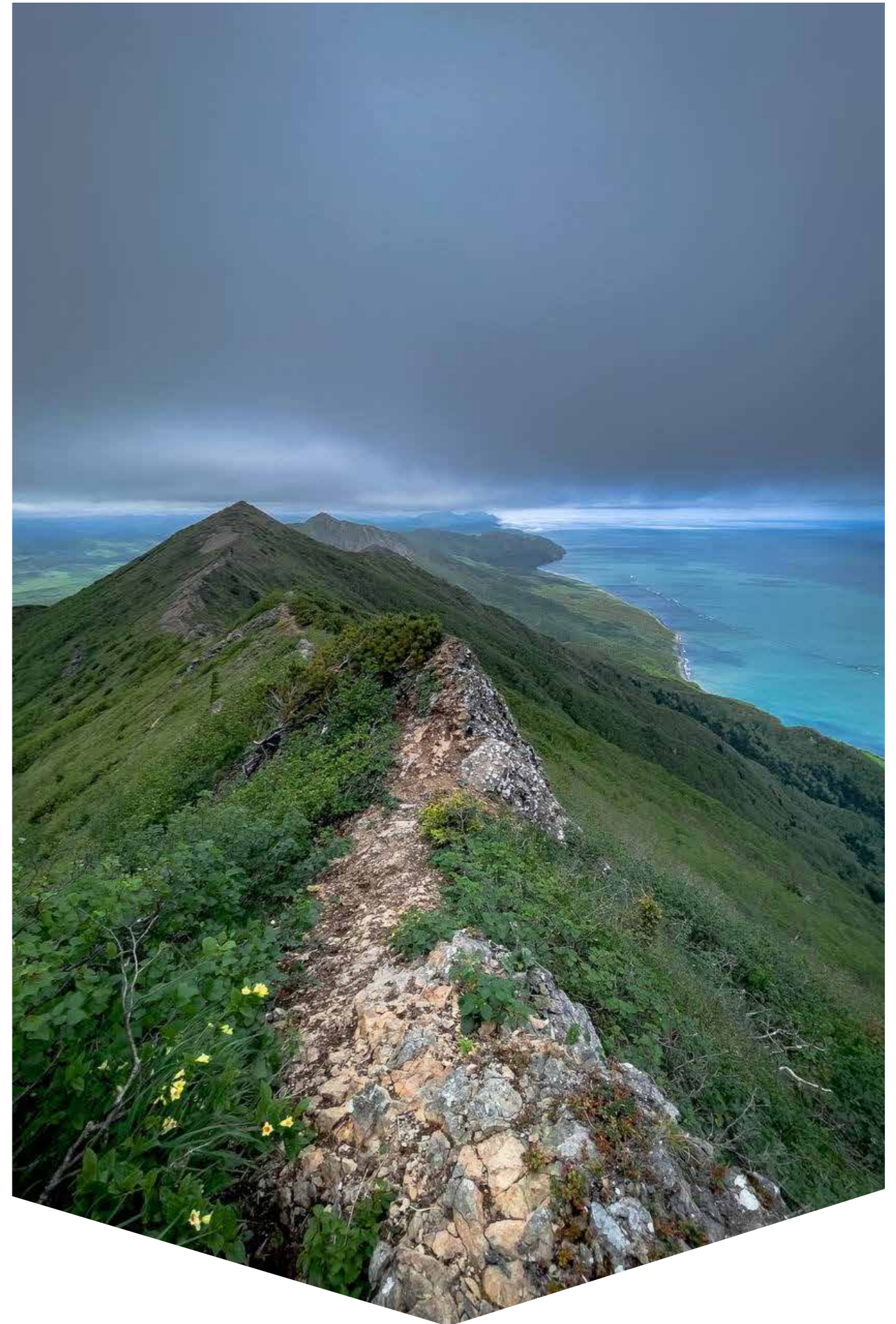
зов, что позволило получить численные значения содержания органического углерода и связать их с динамикой илистых осушек и маршей в эстуарной зоне морского залива. В дельтовых отложениях илистой осушки, расположенной непосредственно в эстуарной зоне реки, в отличие от донных осадков лагун, практически отсутствует автотонный органический углерод. Это позволяет определить объем взвешенных наносов, которые осаждаются в эстуарной зоне и оценить количество органического углерода, который остается в отложениях эстуария. Такая оценка предварительно дает возможный среднегодовалый объем около 2 тыс. тонн органического углерода

Были также оценены объемы углерода, ежегодно фиксируемого в донных осадках закрытой лагуны Айнское и лагуны Ныйская, которые оказались на порядок выше объемов органического углерода, фиксируемого в маршах, а по сравнению с лагуной Чайво и бухтой Лососей - примерно в полтора раза. Таким образом, общая консервативная оценка по депонированию

углерода только лагунными биоморфолитосистемами в пересчете на эквивалент CO₂ составляет не менее 500 000 тонн/год. Хотя предложенная концепция фиксации органического материала в маршевых образованиях лагун региона основана на сравнительно грубых оценках параметров системы осадконакопления и требует развития и уточнения, в частности, в контексте биогидрогеохимического круговорота вещества в эстуарно-лагунных водно-болотных угодьях, полученные оценки вселяют надежду. Последующие работы по исследованию секвестрационной способности прибрежно-морских биоморфолитосистем предполагают создание системы получения данных по уровню содержания парниковых газов в атмосфере, воде и почвенном газообмене и создание наземных опытно-промышленных площадок в пределах наземной, супралиторальной зоны карбонового полигона Сахалинского госуниверситета, где будут испытываться технологии и создаваться искусственные зоны ускоренного алеврито-пелитового и органогенного осадконакопления



Общий вид илистой осушки (вверху) и отобранная колонка отложений илистой осушки (внизу)



КЛЮЧЕВЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ ПОЛИГОНА

РОСЯНКА

Калининградская область
Балтийский федеральный университет
им. И. Канта

На карбоновом полигоне «Росьянка» проведена инвентаризация растительных сообществ. Была создана детализированная цифровая карта растительности карбонового полигона на основе данных ДДЗ и полевых изысканий; она включает более 100 полигональных объектов, относящихся к 28 классификационным единицам: 6 типам растительности и 22 категориям растительных сообществ. На репрезентативных площадках, представляющих ключевые элементы растительного покрова карбонового полигона (нарушенного торфяника), организованы регулярные измерения потоков CH_4 и CO_2 камерным методом, а также сопутствующие измерения экологических параметров с целью определения участков с разным уровнем потоков парниковых газов с возможностью их картирования. Таким образом, была впервые выполнена апробация в условиях Балтийского региона методов привязки потоков парниковых газов к площадным объектам, картируемым и унифицируемым в региональном и межрегиональном масштабах. Полученные результаты дают возможность мониторинга интегральных потоков при проектах секвестрации

(например, восстановление болотных экосистем), а также служат основой для моделирования на основе привязки дополнительных параметров (геохимические, почвенные, гидрологические и др. исследования)

На морской площадке полигона в 2022 г. продолжены комплексные исследования морской среды и получена оценка вертикального распределения параметров первичной продуктивности и соотношения между основными компонентами планктона (фито-, зоо- и бактериопланктон) по биомассе и функциональности для всех сезонов года. Это принципиально важно для оценки способности океана связывать CO_2 , определяемой интенсивностью «биологического насоса» (т.е. погружением фотосинтетически произведенного органического вещества в глубь океана до того, как произойдет реминерализация (разложение) этого органического вещества). Анализ данных, полученных в 2021 году, показал, что основная часть первичной продукции была сосредоточена в верхнем 10-метровом слое водной толщи. Фотосинтетическая ак-

тивность, отражающая степень использования поглощенной световой энергии в процессах синтеза органического вещества, увеличивалась в июне и октябре. Интегральные по глубине значения биомасс, хлорофилла-а, бактерий и фитопланктона были максимальными в октябре. Максимальные значения биомассы зоопланктона были определены в июне, и они были в 5-14 раз выше, чем в другие сезоны. Функциональные характеристики биологических компонентов экосистемы, связанные с балансом взвешенного органического углерода в морской среде (первичная продукция фитопланктона, интенсивность питания зоопланктона и бактериальная деструкция), интегрированные для слоя 0-25 м, существенно различались в течение года. Летом синтезированный фитопланктоном взвешенный органический углерод практически не образует нисходящего потока, а остается в пределах верхнего деятельного слоя в виде биомассы и метаболитов бактерио- и зоопланктона. Также на морском участке полигона на основе измерений впервые были рассчитаны потоки метана из донных осадков



Карбоновый полигон
Росьянка общий вид



Камерные измерения потоков парниковых газов на полигоне «Росьянка»

Исследуемый участок с открытым торфом



Сфагновый мох – главный секвестратор углерода на торфяниках

КЛЮЧЕВЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ ПОЛИГОНА

УРАЛ-КАРБОН

Свердловская область
Уральский федеральный университет
имени первого Президента России
Б. Н. Ельцина

На полигоне «Урал-Карбон» выполнена первичная оценка объема поглощенного местными экосистемами из атмосферы углерода ($\text{тCO}_2/\text{га}$) за вегетационный период апрель-сентябрь и проведены сравнения с данными за предыдущие годы. Объем поглощенного из атмосферы CO_2 таежными ландшафтами участка карбонового полигона «Урал-Карбон» в Коуровке, выраженный в тоннах на гектар, варьируется в зависимости от года в диапазоне от 14 т/га до 2,35 т/га: в 2013 г. – 141 т/га, в 2014 г. – 143 т/га, в 2015 г. – 2,35 т/га, в 2020 г. – 2,32 т/га, в 2021 г. – 1,52 т/га

Для получения интегральных оценок была предложена оригинальная нейросетевая модель для оценки потоков углерода (GPP – валовая первичная продукция, NEE – чистая первичная продукция, TER – дыхание экосистемы) в бореальных лесных экосистемах. Модель обучалась с использованием

набора данных с сервиса FLUXNET для метеостанции Ru-Fyo, расположенной в бореальном хвойном лесу в Тверской области. После обучения модель была апробирована на карбоновом полигоне УрФУ. На вход модели подавались данные спектрорадиометров MODIS/Aqua и MODIS/Terra за 2002-2022 и 2000-2022 гг. соответственно и данные ретроспективного климатического анализа ERA5 за 2000-2022 гг. для участка карбонового полигона «Урал-Карбон» Коуровской обсерватории УрФУ

Полученные оценки величины потоков углерода GPP (валовая первичная продукция) для таежных ландшафтов в Коуровке в 2021-2022 гг. приведены на рисунке и показывают выраженную сезонную изменчивость с амплитудой до 10 г/см^2 в сутки. Указанные оценки будут валидироваться уже проведенными наземными измерениями

Результаты оценки GPP (валовая первичная продукция) таежных ландшафтов карбонового полигона «Урал-Карбон» в Коуровке в 2021-2022 гг., полученные с использованием оригинальной нейросетевой модели

GPP. Нейросетевая модель. 2021-2022



ЧАШНИКОВО

Московская область
Московский государственный
университет им. М. В. Ломоносова

Московским государственным университетом им. М. В. Ломоносова проведен анализ растительного покрова на участке полигона и определены количественные параметры растительности с учётом сезонности. Для этого были использованы данные цифровой аэрофотосъемки (АФС). Уникальность полигона «Чашниково» состоит в широком наборе имеющихся ландшафтов на полигоне. Здесь хвойно-широколиственные леса на дерново-подзолистых почвах сочетаются с лугами, болотами и пашней, что позволяет одновременно разрабатывать низкоуглеродные стратегии природопользования, лесовосстановительные и агрономические технологии, направленные на долгосрочное депонирование атмосферного углерода в лесных, пойменных и аграрных ландшафтах

В результате проведённого исследования растительного покрова полу-

чен массив данных и выполнен его анализ с применением профильных программных продуктов. Это позволило создать ГИС продукт, расположенный в настоящее время на картографическом сервере проекта «Карбоновый полигон МГУ» (<http://qgis.carbon.msu.ru/qwc>). В итоге получено комплексное решение, позволяющее анализировать, хранить и визуализировать данные АФС с БПЛА и потенциально спутников ДЗЗ с установлением участков понижения или повышения индекса NDVI при мониторинге развития растительного покрова, включая дикорастущие растения и сельскохозяйственные культуры

Выявленные по результатам анализа созданной базы данных закономерности в системе «почва - растение - индекс NDVI» дают возможность оптимизировать мониторинг динамики

фитомассы, получать объективные входные данные для параметризации математических моделей баланса климатически активных газов. В ходе проведенных исследований на основе фенологических наблюдений в первую половину вегетационного сезона и данных БПЛА было установлено, что в зимний период значительная часть территории карбонового полигона покрыта вечнозелёной растительностью хвойных пород, в тёплое время года вегетирующий растительный покров значительно расширяется. Подробная карта распределения фитомассы по результатам анализа индекса NDVI представлена на геосервере карбонового полигона МГУ. Данная картограмма позволяет вычислить площадь участков с различной активностью в отношении эмиссии либо ассимиляции климатически активных газов



Кустарничково-лесной ландшафт
полигона «Чашниково»

КЛЮЧЕВЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ ПОЛИГОНА

КАРБОНОВЫЙ ПОЛИГОН КАЛУЖСКИЙ

Калужская область
Компания Ctrl2GO (ООО «КонтролТyГо.Ру»)

На полигоне была выполнена разработка технологий повышения секвестрации парниковых газов лесными насаждениями за счет внесения комплекса минеральных удобрений. Методика проведения эксперимента разработана Всероссийским научно-исследовательским институтом лесоводства и механизации лесного хозяйства. Методика адаптирована к требованиям нормативных и правовых актов, нормативных технических документов, действующих на территории Российской Федерации, может использоваться при проведении аналогичных экспериментов в других регионах страны. В 2021-2022 году заложены 2 опытные площадки, внесены комплексы удобрений, проведены соответствующие измерения в начале и в конце сезона. Также проведена

полная наземная таксация растительности (сплошной пересчет) на опытных площадках и расчет запасов углерода в биомассе. Данные первого года эксперимента и научные расчеты показывают возможность увеличения секвестрации при однократном применении подобранных комбинаций минеральных удобрений до 30% на период 7-10 лет

Также на полигоне выполнялась разработка технологий повышения секвестрации парниковых газов лесными насаждениями за счет оптимизации плотности и видового состава. Методика проведения эксперимента разработана Всероссийским научно-исследовательским институтом лесоводства и механизации лесного хозяйства. Методика адаптирована к

требованиям нормативных и правовых актов, нормативных технических документов, действующих на территории Российской Федерации, может использоваться при проведении аналогичных экспериментов в других регионах страны. В 2021 году заложены 2 опытные площадки, выполнены работы по прореживанию, проведены соответствующие измерения в начале и в конце сезона. Также проведена полная наземная таксация растительности (сплошной пересчет) на опытных площадках и расчет запасов углерода в биомассе. Данные первого года эксперимента и научные расчеты показывают возможность увеличения секвестрации при однократном применении технологии до 25% на период 15-20 лет



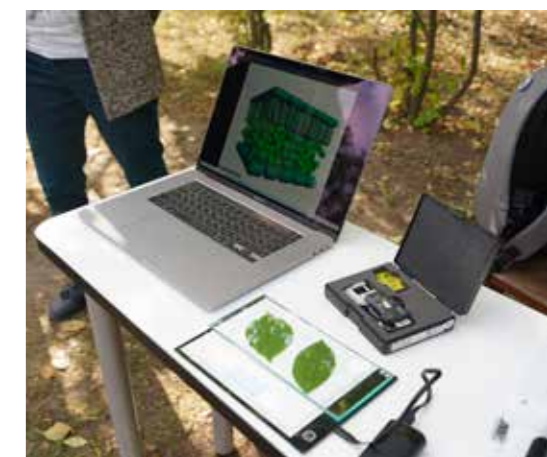
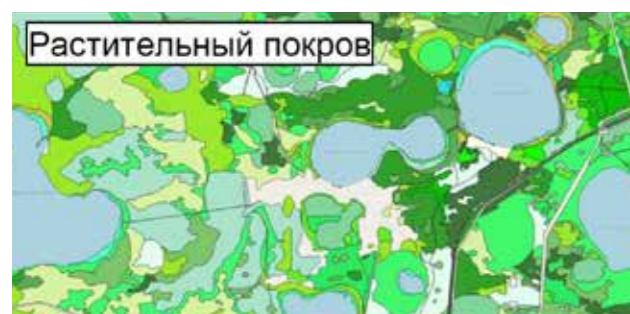
Местоположение участков проведения экспериментов

КЛЮЧЕВЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ ПОЛИГОНА

ТЮМЕНСКИЙ КАРБОНОВЫЙ ПОЛИГОН

Тюменская область
Тюменский государственный
университет

На карбоновом полигоне Тюменского государственного университета «Кучак» создана интерактивная цифровая база данных региона, позволяющая анализировать характеристики основных параметров поверхности, включая гипсометрические характеристики, рельеф, типы растительности и землепользования, а также индексы вегетации (например, NDVI), получаемые по спутниковым данным. На основе базы данных создан интернет-портал <https://kuchakutmn.nextgis.com/resource/9/display?panel=layers>, позволяющий совместно анализировать различные слои характеристик



Республика Татарстан
Казанский (Приволжский)
федеральный университет

На карбоновом полигоне Республики Татарстан «Карбон Поволжье» проведено первичное определение запаса углерода в биомассе деревьев. Запас углерода в фитомассе деревьев колеблется от 0,043 т до 2,404 т на дерево и в целом составляет 40,77 тС на площадке наблюдений или 163 тС/га, что значительно превышает аналогичные оценки для районов Северного Кавказа, горного Крыма 111,1 т С/га и хвойно-широколиственных лесов. На основе определения запаса углерода в биомассе деревьев, почве и дендрохронологических исследованиях оценен секвестрационный потенциал экосистемы липняка волосистоосокового с елью и дубом на дерново-подзолистых почвах, расположенных на аллювиально-делювиальных четвертичных отложениях третьей террасы крупных рек. Этот участок проектируется как мониторинговая площадка газообмена меж-

ду экосистемой и атмосферой при помощи системы Eddy Covariance. Участок расположен в фитоценозе, широко распространенном на территории Европейской части России, а именно – широколиственном лесу, испытывающем антропогенное давление средней интенсивности и имеющем длинную историю освоения. Впоследствии данные были проанализированы с применением БПЛА, что позволило впервые для лесных экосистем Среднего Поволжья выполнить оценки эмиссионных потерь углерода из лесных почв

На полигоне также ведутся работы по изучению динамики обмена климатически активными газами над акваторией Куйбышевского водохранилища. Выполнена оценка динамики развития фитопланктона в акватории водохранилища на основе спектральных данных и веге-

тационных индексов. Показано, что данные сенсора OLI со спутника Landsat 8 подходят для проведения дистанционного мониторинга «цветения» поверхностных вод Куйбышевского водохранилища. Для выделения областей «цветения» в акватории водохранилища использовался цветовой индекс «Blue/Green». Проведенный анализ снимков, покрывающих акваторию 7 из 8 плёсов Куйбышевского водохранилища в рассматриваемый период, показывает, что «цветение» водорослей наблюдается каждый год. Пик приходится на конец июля – середину августа (среднее значение для июля – 65,7%, для августа – 90,9%). Площадь цветения варьируется от 31,5% до 99,8%, при этом интенсивность цветения в последнем случае, вероятно, связанная с биомассой сине-зелёных водорослей, чрезвычайно высока



Анализ характеристик деревьев на полигоне



Портативная система Li-6800 Li-Cor

КЛЮЧЕВЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ ПОЛИГОНА

КАРБОНОВЫЙ ПОЛИГОН FOR&ST CARBON

Воронежская область
Воронежский государственный лесотехнический
университет им. Г.Ф. Морозова

В Воронежской области в ходе длительного хозяйственного освоения коренные типы экосистем практически полностью преобразованы человеком, а современные тренды климатических изменений приводят к усилению аридизации условий, увеличивают уязвимость лесных экосистем к природным нарушениям и ставят под вопрос возможность устойчивого развития сельского хозяйства на юге Европейской части России.

Карбоновый полигон "FOR&ST CARBON" (сокр. от англ. forest – «лес» и steppe – «степь») характеризует репрезентативные типы экосистем не только Воронежской области, но и всей Центральной лесостепи Русской равнины, включая леса и земли сельскохозяйственного назначения. Лесные экосистемы включают разновозрастные чистые и смешанные древостои, представленные дубом,

сосной, мягколиственными породами, произрастающими в различных лесорастительных условиях. Ряд участков лесного фонда представляют собой площади, охваченные пожарами в 2010 году, в том числе с молодыми лесными культурами и пустолями на местах гарей. Участок, расположенный в природном заказнике «Каменная Степь» и являющийся моделью оптимально организованного агроландшафта, представляет собой лесоаграрный комплекс, состоящий из обрабатываемых сельскохозяйственных земель и лесных полос.

В рамках научно-исследовательских работ на полигоне организуется системный мониторинг эмиссии, секвестрации и оценки запасов углерода в почвах, растительной биомассе и мортмассе различных типов лесостепных экосистем. В 2021-2022 годах на постоянных пробных площадях

были апробированы методики учета пулов и потоков углерода в экосистемах: проведена оценка суммарных и фракционированных запасов фитомассы и мортмассы, а также содержания, профильного распределения и запасов углерода в почвах, с использованием портативной системы измерения газообмена растений измерялась фотосинтетическая активность растений. Исследованиями также охвачены молодые сосново-берёзовые насаждения, созданные в ходе лесовосстановления, для которых динамика накопления углерода до 10 лет не изучена, и данная информация отсутствует в таблицах биологической продуктивности.

Установленный на лесном участке карбоновый полигон Программно-аппаратный комплекс для метеорологического мониторинга атмосферы и почвы отечественного производства регистрирует ком-

Клональное микроразмножение засухоустойчивых форм берёзы



Фрагмент цифровой карты

Создание углеродопонирующих насаждений (осень 2022)

ПРОТОТИПЫ
ПРИРОДНО-
КЛИМАТИЧЕСКИХ
ПРОЕКТОВ



Карбоновые Полигоны
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

«СОЗДАНИЕ УГЛЕРОДОДЕПОНИРУЮЩИХ НАСАЖДЕНИЙ НА УЧАСТКАХ ГАРЕЙ»

Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г.Ф. Морозова

ОСНОВНЫЕ ЗАДАЧИ

1. Преобразование площадей не покрытых лесом земель в земли, покрытые лесной растительностью
2. Снижение риска возникновения лесных пожаров в лесах путём изменения состава древесных пород в них
3. Повышение экологического потенциала и средообразующих функций лесов в малолесной Воронежской области
4. Увеличение стока углерода на землях лесного фонда и обеспечение сокращения промышленных эмиссий парниковых газов АО «Воронежсинтезкаучук»

РЕНТАБЕЛЬНОСТЬ ПРОЕКТА

При базовой норме объема поглощения CO_2 2,54 тонн $\text{CO}_2/\text{га}$; и проектной норме 15 тонн $\text{CO}_2/\text{га}$ и при стоимости депонирования 1 тонны CO_2 1000 рублей за тонну доход за весь жизненный цикл проекта лесовосстановления (20 лет) составит 595 тыс. руб. Накопленная чистая прибыль за двадцатилетний период реализации проекта лесовосстановления, осуществляемого искусственным способом, составит 394 тыс. руб. на 1 га

БАЗОВЫЙ СЦЕНАРИЙ

Естественное возобновление древесной растительности на местах погибших от пожаров насаждений затруднено ввиду неблагоприятных экологических условий (бедные песчаные и супесчаные почвы, недостаточное увлажнение, конкуренция с травянистой растительностью). Гари преобразуются в пустыри, покрытые травянистой растительностью

ПЛОЩАДЬ ПРОЕКТА

Участки учебно-опытного лесничества ВГЛТУ общей площадью 750,8 га.

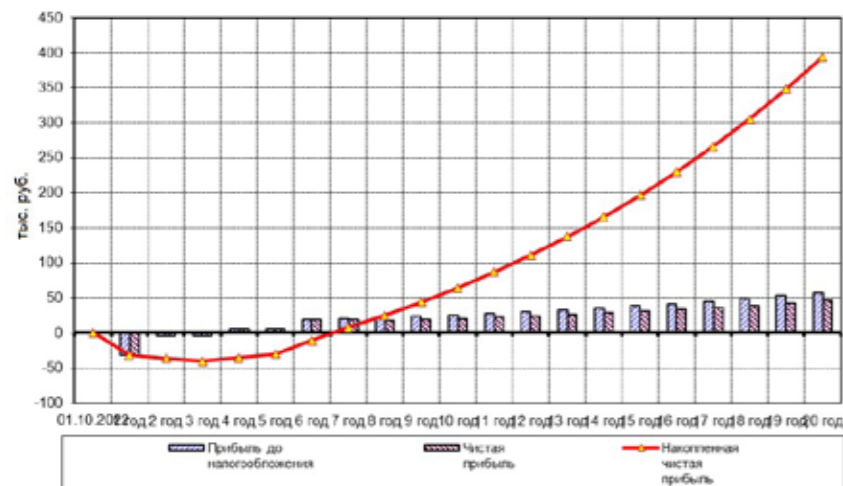
ПРОЕКТНЫЙ СЦЕНАРИЙ

Создание углерододепонирующих плантаций на землях лесного фонда, где естественное лесовозобновление затруднено, а искусственное лесовосстановление путём создания преимущественно монокультур хвойных пород оказывается малоэффективным. Проектный сценарий обеспечивает увеличение по сравнению с базовым сценарием запасов углерода в пуле фитомассы и почвы

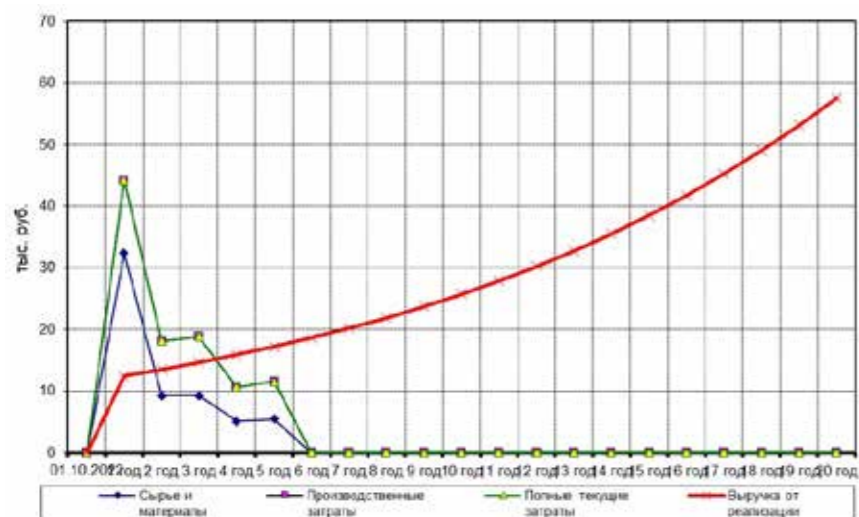
ОЦЕНОЧНЫЙ ОБЪЕМ ПОГЛОЩЕННОГО УГЛЕРОДА

Оценочное поглощение плантационными культурами при высокой агротехнике выращивания –12,4 т. CO_2 га/год





Доход проекта лесовосстановления, реализуемого в Воронежской области, тыс. руб.



Прибыль от реализации проекта лесовосстановления, осуществляемого искусственным способом, тыс. руб.

КРАТКОЕ ОПИСАНИЕ ВЫПОЛНЯЕМЫХ РАБОТ

В ходе лесопосадочных кампаний 2022–2024 гг. будет осуществляться создание смешанных лесных культур с густотой посадки 4000-5000 шт./га с обязательным учётом почвенно-растительных условий

Расчистка площади от порубочных остатков, сухостоя и захламлённости проводится без сжигания. Все древесные остатки подлежат захоронению в почвах

Подготовка почвы осуществляется путём дискования

Выбор породного состава – аборигенные виды древесных пород, обладающие высокой биологической продуктивностью (сосна обыкновенная, селекционные сорта берёзы повислой и тополя)

Посадка семян и саженцев с закрытой корневой системой ручным способом

Комплекс мероприятий по проведению агроуходов включает ручные уходные работы, полив. Запланированы мероприятия по защите от вредителей и пожаров

Тематическая лесная карта пространственного размещения существующих и проектируемых объектов лесной инфраструктуры



КАРБОНОВАЯ ФЕРМА ГРОЗНЕНСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО НЕФТЯНОГО ТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА ИМ. АКАД. М.Д. МИЛЛИОНЩИКОВА

ОСНОВНЫЕ ЗАДАЧИ

Выращивание высокопродуктивных древесных насаждений, лесоразведение и реабилитация земель на рекультивированных загрязнённых территориях с целью развития технологий секвестрации парниковых газов

КРАТКОЕ ОПИСАНИЕ ВЫПОЛНЯЕМЫХ РАБОТ

Описание ландшафтов и биоразнообразия, отбор образцов и геохимический анализ почв
Целевое исследование почвенных профилей и метеонаблюдения
Пульсационные измерения потоков парниковых газов и камерные измерения дыхания почв
Выращивание высокопродуктивных древесных насаждений
Лесоразведение на полупустынных территориях
Реабилитация земель, загрязнённых нефтью, нефтепродуктами и термальными водами

БАЗОВЫЙ СЦЕНАРИЙ

Карбоновая ферма расположена на левом берегу реки Сунжа, на северо-востоке от города Грозный и представляет собой рекультивированную территорию санкционированной городской свалки строительных и бытовых отходов. Предполагается, что строительные и бытовые отходы на протяжении 100-200 лет будут выделять парниковые газы с нарастающей скоростью. Данная территория является источником значительного выделения углекислого газа, закиси азота, F-газы (галогеноиды) и метана. Экспертная оценка суммарной эмиссии различных газов составляет от 2 до 10 т CO₂ эквивалента на га

ПЛОЩАДЬ ПРОЕКТА

23,5 га

ПРОЕКТНЫЙ СЦЕНАРИЙ

Для секвестрации выделяемых почвой карбоновой фермы парниковых газов будет проведена высадка 10 тысяч саженцев пород деревьев, являющихся доминантами в данной климатической зоне и ландшафтной территории и обладающих высокими секвестрационными характеристиками (тополь, дуб, липа, сосна, береза, осина). По предварительным расчетным оценкам это позволит секвестрировать выделяемые газы в размере более 100 т CO₂ за один вегетационный период. Планируется также разработка технологий биореабилитации земель, загрязнённых нефтью, нефтепродуктами и термальными водами. В последующем на рекультивированных территориях планируется посадка древесных насаждений, обладающих высокими секвестрационными способностями.

ОЦЕНОЧНЫЙ ОБЪЕМ ПОГЛОЩЕННОГО УГЛЕРОДА

Прогноз С через 10 лет – от 0.5 до 2.0 т С /год на га или 1.85-7.3 – CO₂ эквивалента на га



«МИКРОВОДОРОСЛИ ЧЕРНОГО МОРЯ»

Институт океанологии РАН

ОСНОВНЫЕ ЗАДАЧИ

Управление скоростью долгосрочного депонирования углерода на дне моря посредством регулирования функционирования так называемого морского «углеродного насоса». Углеродный насос обеспечивает осаждение клеток микроводорослей на морское дно из поверхностного слоя фотосинтеза, а его эффективность в значительной степени зависит от видового состава используемых микроводорослей. Регулирование видового состава осуществляется путем формирования специфической сильно локализованной морской среды за счет изменения ее характеристик и активизации действия факторов среды, оптимальных для интенсивного роста требуемого вида – в данном случае кокколитофориды *Emiliania huxleyi* (класс одноклеточных морских планктонных гаптофитовых водорослей), которая активно использует карбонат кальция в своих оболочках и характеризуется высокими скоростями оседания

БАЗОВЫЙ СЦЕНАРИЙ

В естественных условиях массовое развитие кокколитофорид происходит раз в несколько лет, а доминирующие виды микроводорослей чаще всего погибают еще при оседании, не достигая дна, таким образом возвращая CO_2 в естественный углеродный цикл морской экосистемы

ПЛОЩАДЬ ПРОЕКТА

40 га при начальном апробировании на нескольких десятках метров прибрежного шельфа

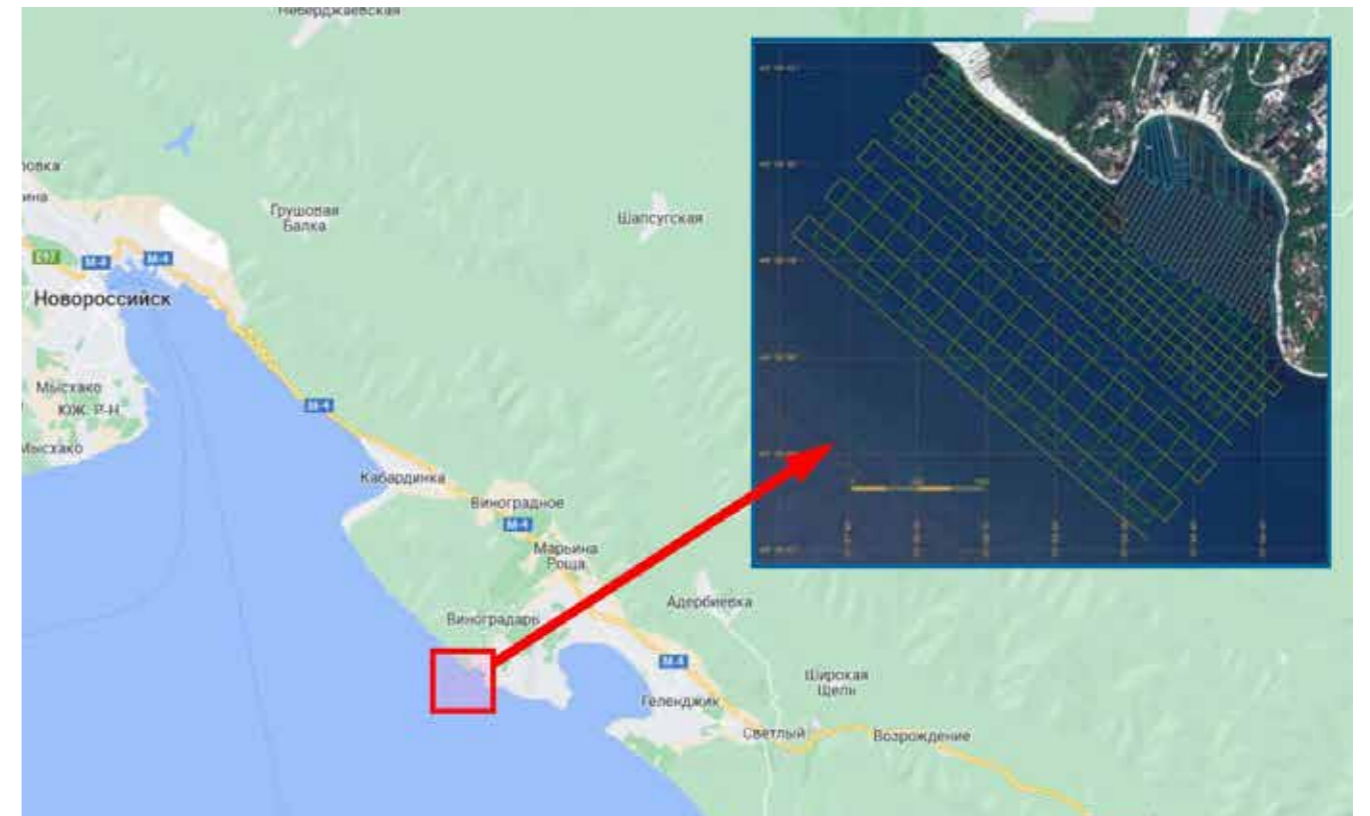
ПРОЕКТНЫЙ СЦЕНАРИЙ

Сценарий предполагает увеличение масштабов и продолжительности «цветения» кокколитофорид в прибрежных районах Черного моря и создание условий для управляемого массового развития кокколитофорид посредством локального изменения параметров морской среды, что позволяет обеспечить взрывной рост популяции и существенно увеличить объемы секвестрации углекислого газа морской средой





Эксперимент по влиянию биогенных элементов на структуру сообщества фитопланктона



КРАТКОЕ ОПИСАНИЕ ВЫПОЛНЯЕМЫХ РАБОТ

Процесс разработки, тестирования и адаптации технологии включает несколько этапов:

- изучение годовой динамики фитопланктона и параметров среды, включая приход солнечной радиации в разных спектральных диапазонах (в процессе, 2022–2023 гг.)
- натурные эксперименты по изучению влияния абиотических факторов среды на соотношение видов микроводорослей и их продуктивность в лабораторных экспериментах (ведутся, до середины 2023 г.)
- построение и верификация модели роста многовидовой популяции фитопланктона, включая кокколитофориды *Eutima huxleyi*, по результатам экспериментов (разработка будет закончена в 2023 г.)
- оценка количества депонированного углерода по результатам экспериментов
- эксперименты в натуральных условиях в мезокосмах и оценка возможности масштабирования технологии
- практическая реализация проектной технологии

ОЦЕНОЧНЫЙ ОБЪЕМ ПОГЛОЩЕННОГО УГЛЕРОДА

От 0.2 до 2.0 тС/год на га



«МОРСКАЯ КАРБОНОВАЯ ФЕРМА ЗАЛИВА АНИВА»

Сахалинский государственный университет

ОСНОВНЫЕ ЗАДАЧИ

Оценка секвестрации морской экосистемы залива Анива при совместном выращивании двустворчатых моллюсков и морских водорослей в расчете на 1 га акватории. Разработка и апробирование технологий долговременной фиксации углерода путем переработки продукции карбоновых ферм (водорослей, створок моллюсков и т.д.). Оценка технологического и экономического цикла выращивания и переработки морских водорослей в карбоновые единицы. Разработка бизнес-модели марикультурного хозяйства как морской карбоновой фермы

БАЗОВЫЙ СЦЕНАРИЙ

Поглощение растворенного в воде углекислого газа водными организмами в процессе своей жизнедеятельности носит постоянный характер. Однако в процессе функционирования морской экосистемы накопленный организмами углерод, в основном, поступает обратно в среду в процессе их жизнедеятельности или разложения мертвого органического вещества. Лишь небольшая его часть поступает в более глубоководные районы на захоронение

ПЛОЩАДЬ ПРОЕКТА

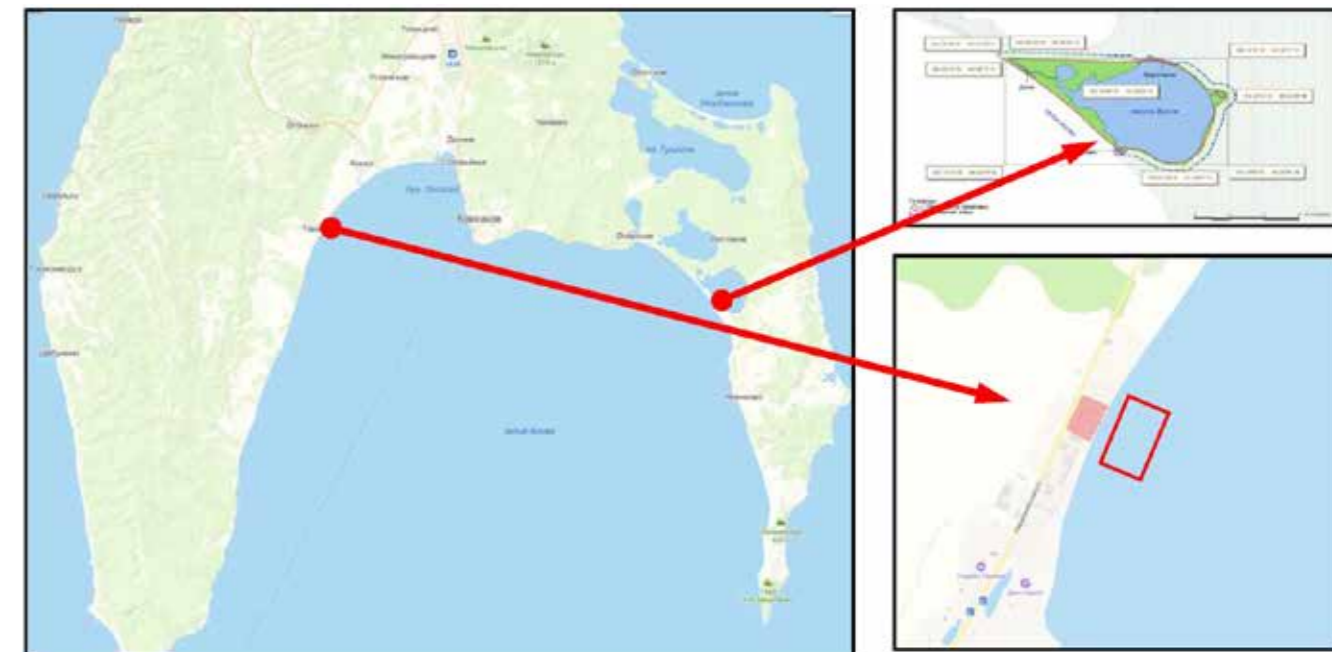
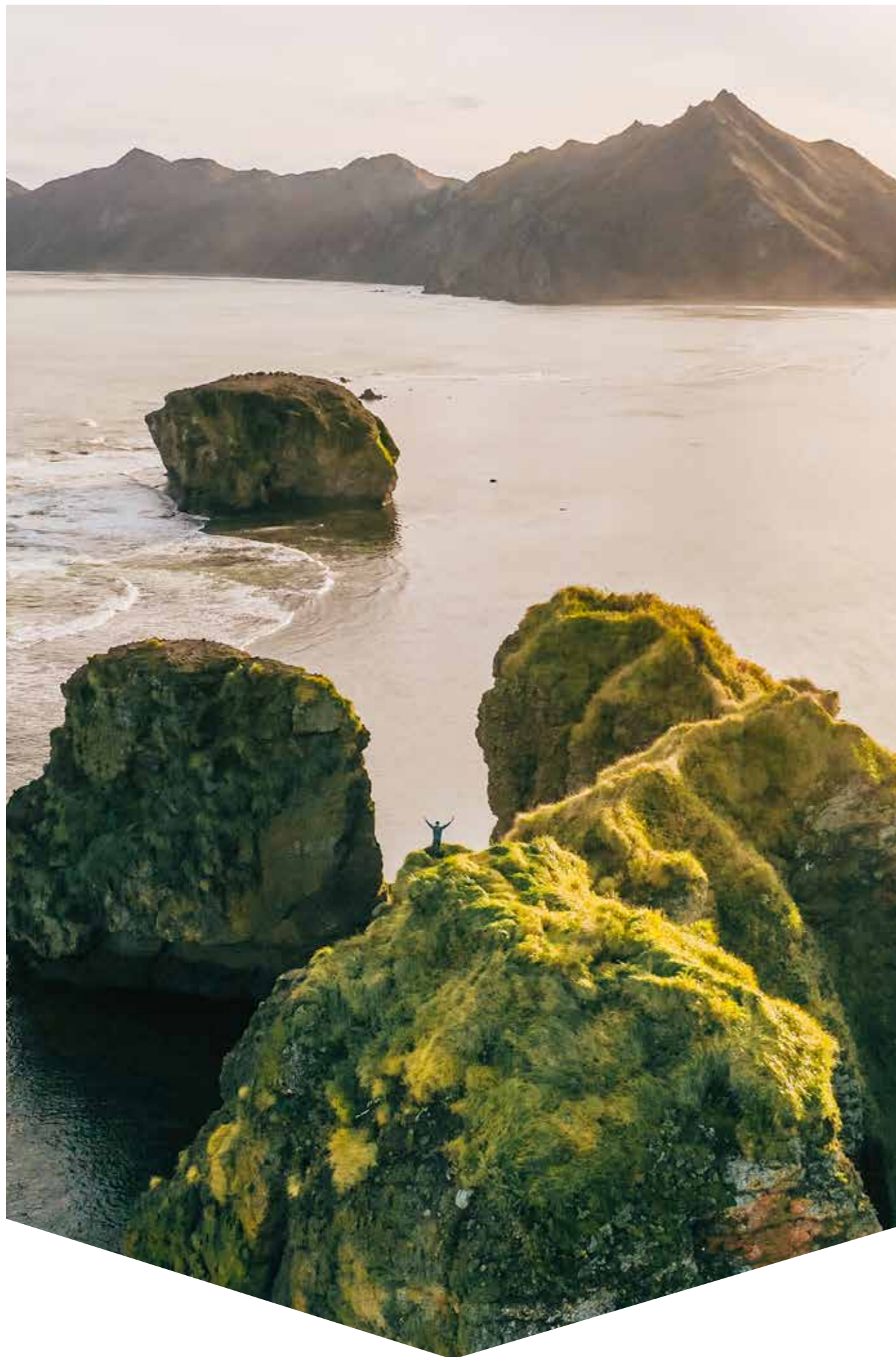
Морская часть составляет 5 га, наземная инфраструктура (с.Таранай) – 1,8 га

ПРОЕКТНЫЙ СЦЕНАРИЙ

Дополнительный эффект в поглощении углекислого газа морскими экосистемами возможно получить при развитии марикультурных хозяйств с функциями карбоновых ферм - производство «BlueCarbon». Пригодные для интенсивной марикультуры акватории (без судоходного фарватера) у побережья Сахалинской области составляют более 1 млн га. Планируемые направления:

1. Разработка методологии оценки базовой линии климатического проекта (измерение поглощения и накопления углерода в фитомассе морских водорослей и двустворчатых моллюсках: натурные исследования, экспериментальные работы; моделирование природного цикла углерода в заливе Анива)
2. Апробирование технологий достижения дополнительного антропогенного эффекта поглощения парниковых газов (установка системы замкнутого водоснабжения для измерения поглощения углекислого газа при разных режимах выращивания гидробионтов, в том числе с ускоренным накоплением биомассы в районах сброса сточных вод, установка морской плантации водорослей и моллюсков)
3. Производство биоугля из водорослей, порошка из створок моллюсков и т.д.





КРАТКОЕ ОПИСАНИЕ ВЫПОЛНЯЕМЫХ РАБОТ

Создание цифровых карт морского участка карбоновой фермы с характеристиками рельефа дна, береговой линии, поверхностной и подповерхностной температур и соленостей, а также гидрохимических характеристик, включая параметры цикла углерода

Закупка и монтаж установки замкнутого водоснабжения на берегу (с. Таранай), посадка гидробионтов, отработка технологии ускоренного накопления биомассы

Установка морской плантации водорослей и моллюсков

Регулярные измерения содержания растворенных газов и других параметров в морской воде в районе плантаций и без нее

Проведение измерений поглощения и накопления углерода в фитомассе морских водорослей и двустворчатых моллюсков

Проведение экспериментов по переработке водорослей в биоуголь и створок моллюсков в порошок для добавок в строительные материалы

ОЦЕНОЧНЫЙ ОБЪЕМ ПОГЛОЩЕННОГО УГЛЕРОДА

Предварительные оценки показывают, что совместная марикультура морских водорослей (например, ламинарии японской) с двустворчатыми моллюсками может дать дополнительную секвестрацию в заливе Анива, объем которой находится в стадии оценивания

«ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ РЕАБИЛИТАЦИЯ ТОРФЯНИКА ВИТТГИРРЕНСКОГО»

Балтийский федеральный университет им. И. Канта

ОСНОВНЫЕ ЗАДАЧИ

Восстановление ранее уничтоженных торфяных болот и их экологических функций путём повышения уровня грунтовых вод, что позволит предотвратить пожары, значительно снизить выбросы парниковых газов, создать условия для репатриации утраченных видов флоры и фауны. На восстанавливаемых болотах возможно и рациональное их использование, в частности, выращивание биомассы болотных растений (тростника, осоки, сфагна, клюквы и др.)

КРАТКОЕ ОПИСАНИЕ ВЫПОЛНЯЕМЫХ РАБОТ

Разработка проекта и составление проектно-сметной документации для проведения обводнения торфяника Виттгирренского
Разработка прогнозной модели восстановления экосистемы торфяного сторожждения с учетом особенностей геологического строения торфяной залежи и измененного гидрологического режима
Согласование проекта в региональном Правительстве
Реализация проекта обводнения
Долговременный многолетний климатический мониторинг

БАЗОВЫЙ СЦЕНАРИЙ

В случае отсутствия мероприятий по экологической реабилитации болота угроза пожаров возрастает. Кроме того, осушенное болото не только не улавливает CO₂ из атмосферы, но и продолжает эмитировать парниковые газы в окружающую среду. Выбросы парниковых газов с осушенных торфяников достигают одной пятой промышленных выбросов. Более того, территории, прилегающие к осушенным болотам, часто тоже иссушаются. Происходит катастрофический рост пожарной опасности на осушенных, а также на прилегающих территориях.

ПЛОЩАДЬ ПРОЕКТА

Торфяник площадью 112,4 га (управляемая система), вторичное обводнение планируется на 57 га

ПРОЕКТНЫЙ СЦЕНАРИЙ

1. Восстановление гидрологического режима каскадным перекрытием осушительных канав с помощью плотин, дамб, торфяных перемычек и шлюзовых установок
2. Воссоздание растительного покрова за счёт распространения из рефугиумов на месте, искусственной репатриации и удаления чужеродных видов

ОЦЕНОЧНЫЙ ОБЪЕМ ПОГЛОЩЕННОГО УГЛЕРОДА

4,8 тCO₂/год на га



Полевые исследования на карбоновой ферме в химической мобильной лаборатории



«ЧАШНИКОВО – ЛЕС»

Московский государственный университет
им. М.В. Ломоносова

ОСНОВНЫЕ ЗАДАЧИ

Разработка и проверка методологии балансовой количественной оценки и мониторинга углеродного бюджета природных и антропогенно-преобразованных ландшафтов с анализом пространственной и сезонной динамики потенциала секвестрирования углерода

БАЗОВЫЙ СЦЕНАРИЙ

Участок ельника, утративший свою структуру после нашествия короеда-типографа, в результате чего происходит усыхание пород. В последующие годы прошла серия ветровалов. В настоящее время осуществляется вторичная сукцессия

ПРОЕКТНЫЙ СЦЕНАРИЙ

Лесовосстановление (ель обыкновенная). Территория находится в зоне южной тайги, для которой характерна ель обыкновенная

КРАТКОЕ ОПИСАНИЕ ВЫПОЛНЯЕМЫХ РАБОТ

Выбор участка площадью 1 га в лесном массиве для лесовосстановления. А также близлежащего участка 1 га для контроля. На 1-2 террасе реки Клязьма. Находясь в зоне южной тайги, выбирается участок, занятый преимущественно елью обыкновенной. Геоботаническое описание, анализ основных почвенных и климатических показателей

Заказ в питомнике материала (2 тыс. штук ели обыкновенной), посев, уход, перевалка 1 раз, в итоге получение контейнера Р9 с растениями высотой 10–15 см, готовых к посадке осенью 2023 г.

Организация теплицы для лесных сеянцев для воспроизводства

Посев в мультитяпеты семенами 2 тыс. штук. (продолжительность 2 года)

Разработка почвенной конструкции, которая применяется на этапе первой перевалки в контейнер Р9 (водоудерживающий материал, удобрения)

Подготовка 1 га деградированного лесного участка для лесовосстановления под посадку осенью этого года (конец августа начало сентября), контейнеры Р9

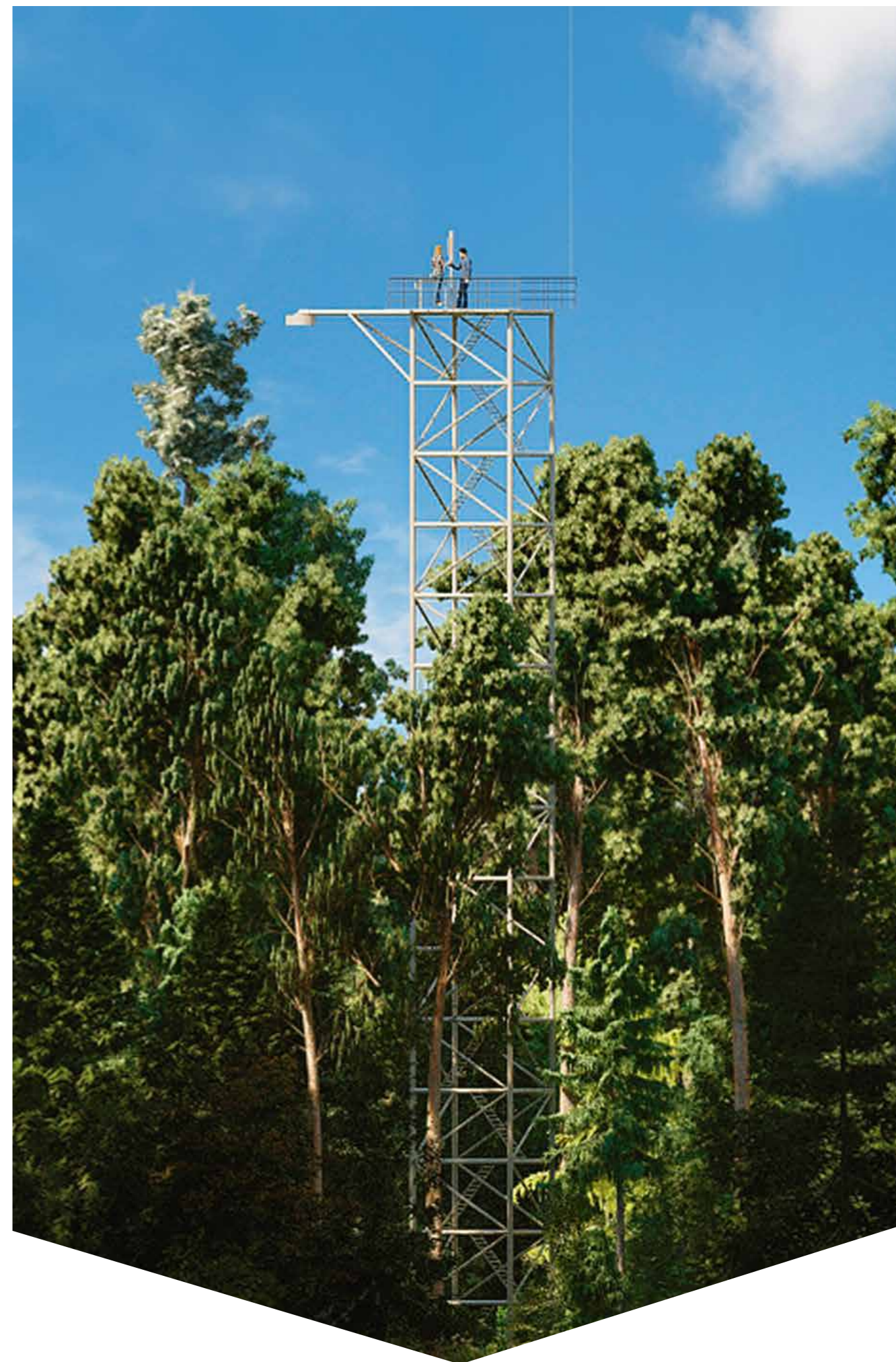
Посадка
Уход (прополка от ДКР осенью следующего года)

ПЛОЩАДЬ ПРОЕКТА

1 га под лесовосстановление и 1 га под контроль, а также 1 сотка в питомнике под разведение сеянцев

ОЦЕНОЧНЫЙ ОБЪЕМ ПОГЛОЩЕННОГО УГЛЕРОДА

До 2 тCO₂/год на га



«РЕКУЛЬТИВИРУЕМЫЙ ГРАНИТНЫЙ КАРЬЕР»

Уральский государственный лесотехнический университет

ОСНОВНЫЕ ЗАДАЧИ

Изучение потенциальных возможностей депонирования углерода компонентами искусственных лесных насаждений различного видового состава, отработка методик определения депонирования углерода различными компонентами лесных насаждений, подбор ассортимента древесно-кустарниковых пород для биологической рекультивации выработанных гранитных карьеров с максимальным депонированием углерода из атмосферного воздуха

РЕНТАБЕЛЬНОСТЬ ПРОЕКТА

При первоочередных инвестициях в проект (подготовка почвы, закупка посадочного материала, посадка лесных культур и уход за ними) в объеме 3 млн. руб. проект может стать рентабельным через 8-10 лет

БАЗОВЫЙ СЦЕНАРИЙ

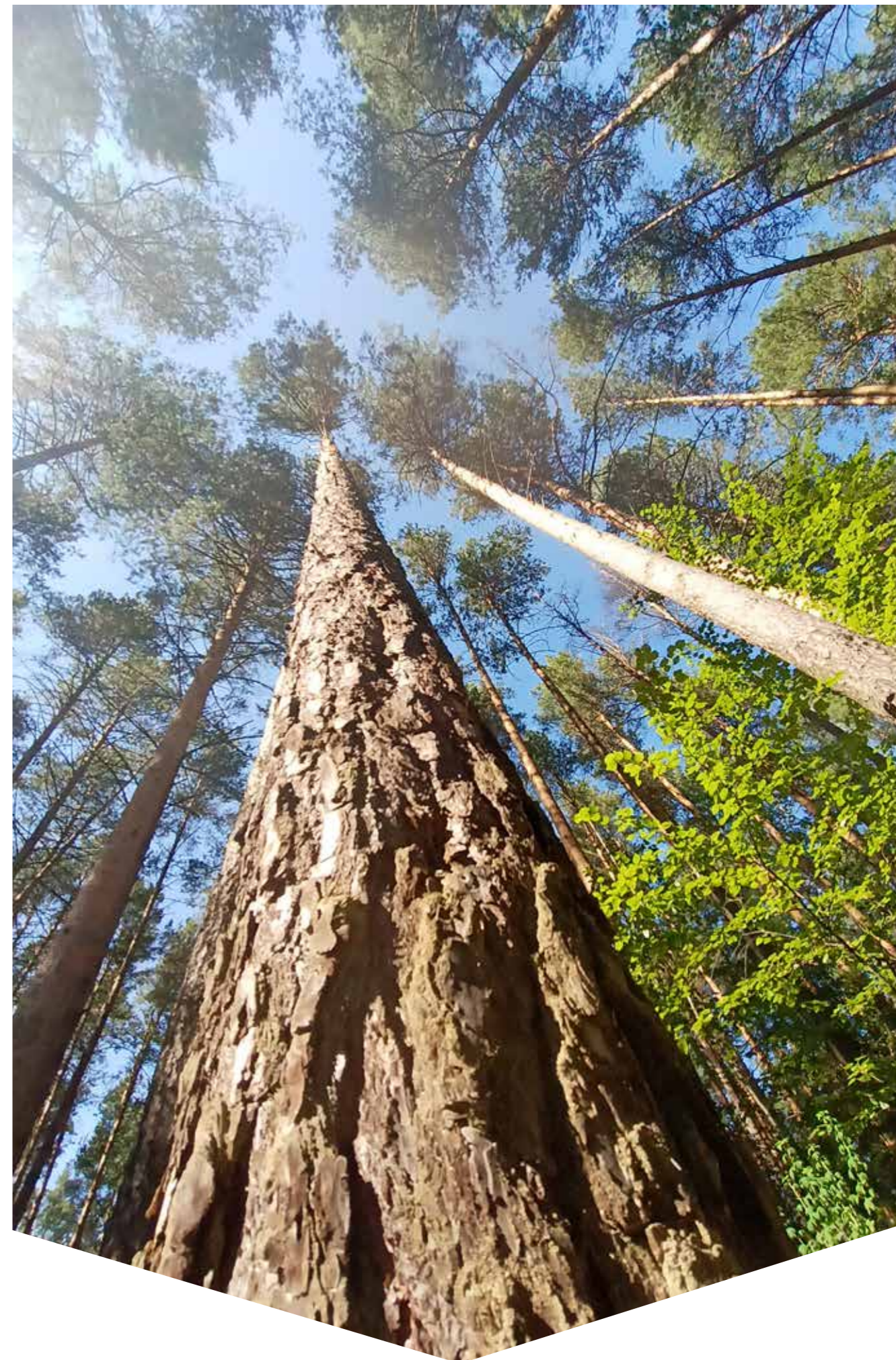
При отсутствии рекультивационных работ на основной части выработанного карьера в течение ближайших десятков лет будет формироваться растительность. Причиной медленного формирования растительности (сначала лишайниковой, затем травянистой и только спустя многие годы древесно-кустарниковой) на большей части выработанного гранитного карьера является отсутствие почвы. Территория выработанного карьера представляет собой гранитное основание, лишенное плодородного слоя почвы. Таким образом, данная территория не только будет исключена из хозяйственного использования и не будет продуцировать древесину и другую продукцию, но и не будет обеспечивать депонирование углерода из атмосферного воздуха, поскольку на ней отсутствует растительность, осуществляющая фотосинтез

ПЛОЩАДЬ ПРОЕКТА

Общая площадь карбоновой фермы составляет 1,2 га

ПРОЕКТНЫЙ СЦЕНАРИЙ

Для получения углеродных единиц в процессе реализации проекта планируется провести комплекс работ по технической и биологической рекультивации. Установлены таксационные показатели насаждений, естественно сформировавшихся на части выработанного гранитного карьера. Данные о естественном формировании древесной растительности создадут базовую основу для определения объема поглощенного углерода в древесине, естественно формирующейся на выработанных гранитных карьерах в условиях Средне-Уральского таежного лесного района. Основной объем работ предполагается выполнить на той части выработанного гранитного карьера, где отсутствует какая-либо растительность, точнее, имеют место единичные экземпляры, произрастающие в трещинах гранита





Слева - внешний вид участка расположения карбоновой фермы, хорошо видна бедная растительность на участке расположения фермы. В центре - Подрост сосны на выработанном гранитном карьере. Справа - Облепиха крушиновидная на выработанном гранитном карьере (естественное зарастание).



КРАТКОЕ ОПИСАНИЕ ВЫПОЛНЯЕМЫХ РАБОТ

На поверхность части карьера, отведенного под создание карбоновой фермы, завозится слой почвогрунта разной толщины. Предварительно территория выравнивается бульдозером и с нее удаляются большие камни. Толщина насыпного горизонта будет варьироваться от 0,3 до 1,5 м с целью создания благоприятных условий для роста высаживаемой на карбоновой ферме древесной растительности

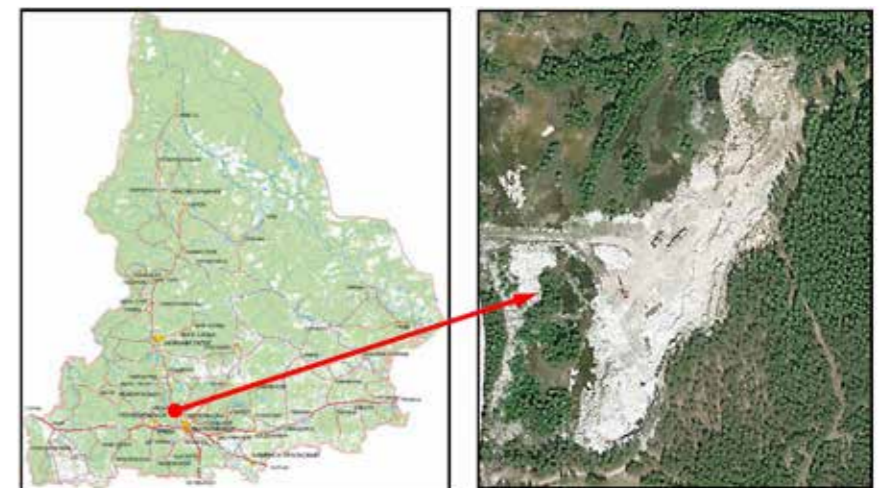
В качестве основной древесной породы для выращивания на карбоновой ферме выбрана сосна обыкновенная (*Pinus sylvestris* L.). Выбор обосновывается тем, что данная порода может произрастать в широком интервале почвенных разностей. Она малотребовательна к плодородию почвы и успешно произрастает в горных условиях, формируя на Урале тип леса – сосняк нагорный. Кроме того, при выборе сосны в качестве главной породы при создании лесных культур учитывался тот факт, что она произрастает вокруг карьера, а подрост зафиксирован непосредственно в карьере

Помимо сосны обыкновенной при создании карбоновой фермы на выработанном гранитном карьере планируется использовать другие виды древесно-кустарниковой растительности, в частности, облепиху крушиновидную (*Hippophae rhamnoides* L.), экземпляры которой также зафиксированы на территории карьера

Таким образом, в процессе реализации экспериментального проекта планируется создание лесных культур разного состава и при различной толщине насыпного слоя почвогрунта. Кроме того, для повышения показателей приживаемости и сохранности высаживаемых сеянцев, а также ускорения их роста планируется внесение удобрений в разных дозах

ОЦЕНОЧНЫЙ ОБЪЕМ ПОГЛОЩЕННОГО УГЛЕРОДА

К 80-летнему возрасту можно вырастить на указанных плантациях сосновые древостои с запасом стволовой древесины 400 м³/га, что обеспечит депонирование углерода в объеме 100 т/га. Средняя скорость депонирования углерода, таким образом, за 80 лет составит 1,25 т/год углерода на га или 4,58 тCO₂/год на га. Очевидно, что скорость депонирования углерода будет не линейна по времени. Ожидается, что через 15 лет после начала выполнения проекта максимальная скорость депонирования углерода будет составлять не менее 5,5 т/год углерода на га или 20,2 тCO₂/год на га



КАРБОНОВАЯ ФЕРМА «УРАЛЬСКАЯ»

Уральский государственный аграрный университет

ОСНОВНЫЕ ЗАДАЧИ

Изучение углеродного баланса и разработка на этой основе технологий мониторинга стока и эмиссии углерода, а также методик расчета углеродного баланса, для агроландшафтов

КРАТКОЕ ОПИСАНИЕ ВЫПОЛНЯЕМЫХ РАБОТ

Использование технологий точного земледелия
Сбалансированное использование химических удобрений
Создание интегрированной системы защиты растений на основе инновационных технологий
Применение методов биологизации земледелия, таких как дифференцированные севообороты, подбор семян и гибридов (с минимальным углеродным следом), управление растительными остатками, использование покровных культур, применение биологических СЗР, применение бактериально-грибковых препаратов, биологических удобрений, микоризы, гуминовых веществ, биостимуляторов роста и др.
Борьба с уплотнением почвы
Разработка углерод-отрицательной системы использования агроландшафта
Оценка секвестрационного потенциала агроландшафта. Разработка методик
Международная аккредитация методик мониторинга стока и эмиссии углерода
Коммерциализация резервов за счет получения конечной продукции с высоким секвестрационным потенциалом

БАЗОВЫЙ СЦЕНАРИЙ

Развивается традиционное земледелие с наличием паров, культивируются традиционные сельскохозяйственные культуры, используются пестициды и агрохимикаты, сельскохозяйственное производство ведется без учета бюджета CO_2

ОЦЕНОЧНЫЙ ОБЪЕМ ПОГЛОЩЕННОГО УГЛЕРОДА

До 375 тонн CO_2 /год при проектном сценарии. Секвестрация CO_2 будет обеспечена за счет прямого посева (No-till), использования покровных культур, эффективного управления азотными удобрениями, выращивания бобовых культур вместо азотных удобрений, отказа от паров, применения бактериально-грибковых препаратов и агролесоводства

РЕНТАБЕЛЬНОСТЬ ПРОЕКТА

При первоочередных инвестициях в проект (сельскохозяйственная техника, оборудование по первичной переработке растений) в объеме 50 млн руб. проект может стать рентабельным через 5 лет

ПРОЕКТНЫЙ СЦЕНАРИЙ

Предлагается внедрение адаптивно-ландшафтного, почвозащитного, ресурсосберегающего и органического земледелия. Основными направлениями являются продолжительная нулевая обработка почвы, сохранение постоянного органического покрова почвы, секвестрация углерода при ведении сельскохозяйственного производства. Это позволит максимально активно секвестрировать углекислый газ при помощи агрофитоценозов и агротехнологий различной интенсивности. Одновременно с возделыванием сельскохозяйственных культур будет обеспечена секвестрация атмосферного углерода в почве на длительное хранение. Применение новых углерод-отрицательных растений обеспечит внедрение высокоэффективных технологий секвестрации и углерода агро- и экосистемами

ПЛОЩАДЬ ПРОЕКТА

Общая площадь карбоновой фермы составляет 25 га



РЕЗУЛЬТАТЫ В ЦИФРАХ

Показатель	Всего
Площадь полигонов, Га	39157,3
Площадь карбоновых ферм, Га	1566,2
Количество разработанных цифровых карт, ед.	35
Количество слоев (или наборов данных) созданных цифровых карт, ед.	170
Количество разрабатываемых технологий секвестрации, ед.	30
Количество накопленной информации (Gb)- метеорологические данные, данные пульсационных и камерных наблюдений, данные химического анализа проб воды и донных отложений, данные дистанционного мониторинга и другие	2787,43
Количество разработанных/разрабатываемых математических моделей для анализа потоков парниковых газов, ед.	14
Количество задействованных научных сотрудников, чел.	333
Количество новых образовательных программ, запущенных с 2021 года, ед.	43
аспирантура	1
бакалавриат	8
магистратура	11
ДПО	23
Количество подготовленных специалистов, чел.	769
бакалавриат	90
магистратура	123
ДПО	556

769
подготовленных специалистов

43
новые образовательные программы

30
разрабатываемых технологий секвестрации

14
математических моделей



ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫЕ ПРОГРАММЫ, ПОДГОТОВЛЕННЫЕ КАРБОНОВЫМИ ПОЛИГОНАМИ



3 НОВЫХ УЧЕБНЫХ МОДУЛЯ (КАЖДЫЙ ВКЛЮЧАЕТ 3-5 МАГИСТЕРСКИХ ПРОГРАММ)

- Биологические аспекты климатических изменений (УРФУ)
- Глобальные изменения климата, парниковые газы и цикл углерода (МГУ)
- Углеродное регулирование в условиях изменения климата (ЮГУ)
- Управление климатическими проектами и низкоуглеродное развитие (ТюмГУ совместно с Высшей Школой Экономики)

9 НОВЫХ МАГИСТЕРСКИХ ПРОГРАММ в рамках направлений «Картография и геоинформатика», «Гидрометеорология и климатология», «Математическое моделирование», «Экология и природопользование» (НГУ, ЧГУ, ГГНТУ, МГУ совместно с ИО РАН, БФУ, ТюмГУ, ЮГУ)

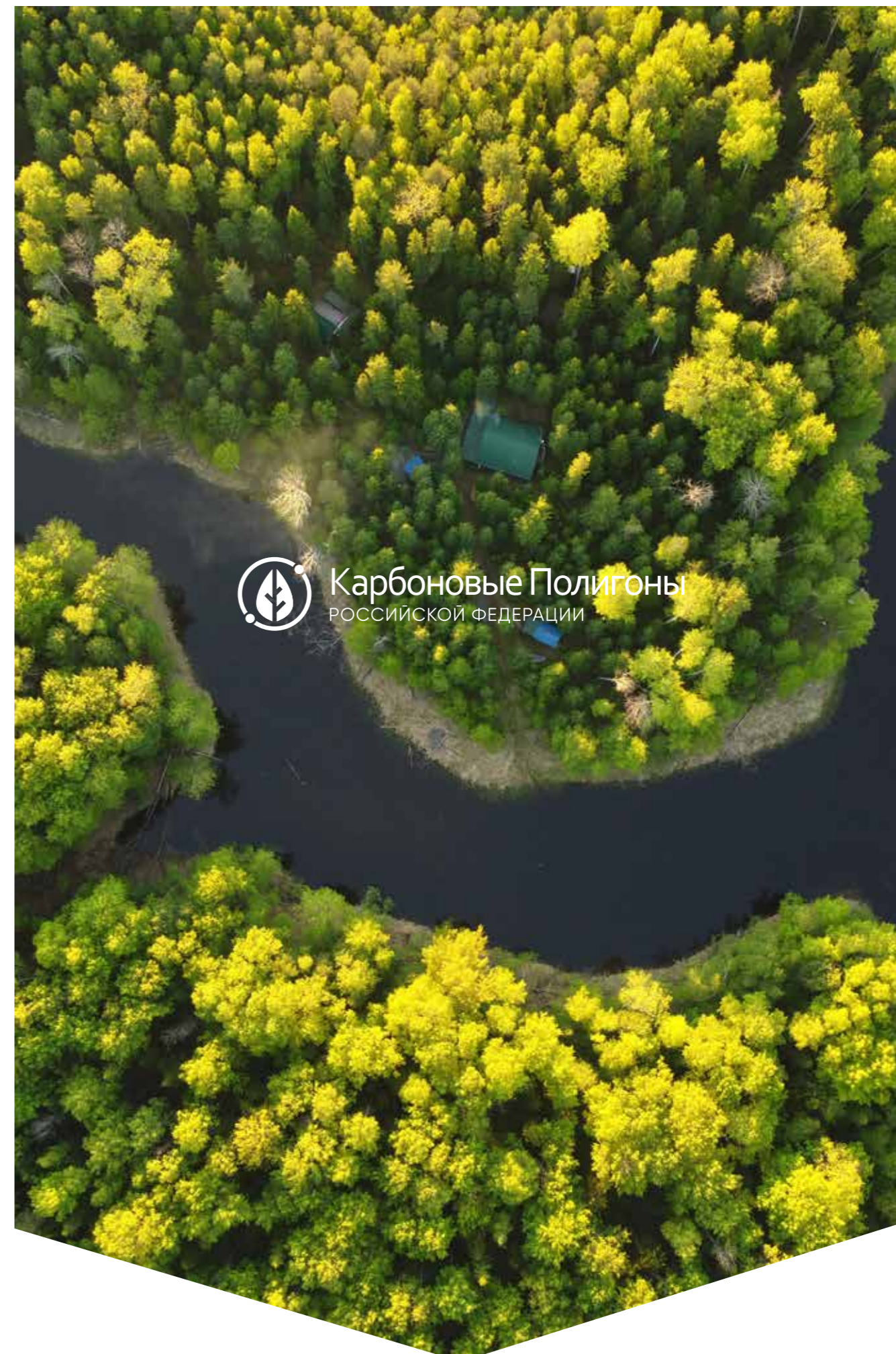
4 НОВЫХ ПРОГРАММЫ БАКАЛАВРИАТА по направлениям «Экология и природопользование» и «Гидрометеорология и климатология» (ЮГУ, НГУ)

МАГИСТЕРСКАЯ ПРОГРАММА НА АНГЛИЙСКОМ ЯЗЫКЕ «Doing Business for Green Economy» (НГУ)

МОДУЛЬНЫЕ ПРОГРАММЫ ДОПОЛНИТЕЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ «Отчётность компаний в области низкоуглеродного и устойчивого развития», «Углеродный менеджмент» (ЮГУ)

ПРОГРАММА КУРСОВ ПОВЫШЕНИЯ КВАЛИФИКАЦИИ «Опыт организации работы и техническое оснащение карбонового полигона» (ЮГУ)

5 НОВЫХ КУРСОВ УЧЕБНЫХ ПРАКТИК по методике и практике наблюдений за потоками парниковых газов в различных экосистемах (ГГНТУ, МГУ совместно с ИО РАН, УфГУ, БФУ, КФУ)



Карбоновые Полигоны
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

**ОТЕЧЕСТВЕННЫЕ ОБРАЗЦЫ
НАУЧНОГО ОБОРУДОВАНИЯ
ДЛЯ КАРБОНОВЫХ
ПОЛИГОНОВ**



Карбоновые Полигоны
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ



ГЕОСКАН В ПРОЕКТЕ «КАРБОНОВЫЕ ПОЛИГОНЫ»

Геоскан – ведущий российский разработчик и производитель беспилотных воздушных судов, а также программного обеспечения для фотограмметрической обработки данных и трехмерной визуализации. Это инновационное оборудование используется по всему миру в самых разных отраслях, в том числе и сфере экологии. С 2021 года Геоскан является одним из ключевых технологических и инфраструктурных партнеров пилотного проекта Минобрнауки по созданию карбоновых полигонов в России. Компания поставляет беспилотные летательные аппараты «Геоскан 401» с различными полезными нагрузками и различным приборным оснащением в научные институты и университеты, являющиеся операторами карбоновых полигонов.

При помощи беспилотных летательных аппаратов ученые собирают

пространственные данные, которые в дальнейшем позволяют выполнять картирование территорий, создавать 3-мерные модели и ГИС-карты, определять характеристики растений и следить за динамикой их роста, получать ЦМР с микроформами рельефа и многое другое. Особенно важно использование на беспилотных летательных аппаратах мульти- и гиперспектральных камер для определения характеристик ландшафтов, непосредственно связанных с потоками климатически активных газов.

Геоскан 401 уже помогает в исследованиях шести организациям, являющимся операторами карбоновых полигонов:

• Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г.Ф. Морозова, оператор полигона FOR&ST CARBON;

- Новосибирский государственный университет, оператор полигона «БиоКарбон»;
- Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, оператор полигона «Геленджик»;
- Балтийский федеральный университет им. И. Канта, оператор полигона «Росзянка»;
- Тюменский государственный университет, оператор Тюменского карбонового полигона;
- Чеченский государственный университет им. А.А. Кадырова и Грозненский государственный нефтяной технический университет им. акад. М.Д. Миллионщикова, операторы полигона WAY CARBON.

geoscan.aero



РАЗРАБОТКА ОТЕЧЕСТВЕННЫХ ПРИБОРОВ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЙ ПОТОКОВ КЛИМАТИЧЕСКИ АКТИВНЫХ ГАЗОВ В МОСКОВСКОМ ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКОМ ИНСТИТУТЕ

Во исполнение Указа Президента РФ от 08.02.2021 N76 «О мерах по реализации государственной научно-технической политики в области экологического развития Российской Федерации и климатических изменений» и приказа Минобрнауки РФ от 20.02.2021 о создании полигонов для разработки и испытаний технологий контроля углеродного баланса МФТИ предлагает рассмотреть возможность создания экспериментального образца аппаратно-программного комплекса оперативного мониторинга процессов секвестра углерода различными типами ландшафтов и его апробации на территории Чеченской Республики, Калужской обл., Ямало-Ненецкого автономного округа. В процессе апробации будут верифицированы методики и проведены испытания аппаратуры, разработанной МФТИ в рамках проектов по выполнению Соглашения с Минприроды РФ от 22.10.2020 N ДК-17-23СОД/32, государственных заданий и работ, финансируемых институтами развития, в частности, развернутых в 2020 г. работ по созданию экспериментального образца системы оперативного мониторинга особо охраняемых природных территорий (ООПТ).

Основной задачей создаваемых по инициативе Минобрнауки РФ карбоновых полигонов является мониторинг обмена парниковых газов (ПГ) между атмосферой и подстилающей поверхностью и оценка поглощающей способности различных типов ландшафтов. Также на полигонах должны быть отработаны методы и

алгоритмы инструментальной оценки источников и стоков ПГ на основе данных пробоотбора и дистанционного зондирования для последующей верификации расчетных методик учета углеродного баланса, основанных на социально-экономических показателях. Предлагаемые методы должны базироваться на российских технологиях и быть признанными международным экспертным сообществом. Особое внимание при реализации проекта должно уделяться метрологическому обеспечению реализуемых методик, в частности, максимальная относительная погрешность оценки содержания основных ПГ в столбе атмосферы не должна превышать 0.2%. При этом в рекомендованном списке оборудования, предназначенного для оснащения карбоновых полигонов в качестве наиболее дорогостоящих позиций присутствуют газоанализаторы американских производителей Li-COR либо Picarro. В частности, заявленная стоимость аппаратуры Li-COR в полной комплектации составляет 28 млн. руб. в ценах 2021 г., продукция Picarro на территории России в настоящее время недоступна. Эти приборы основаны на принципах лазерной спектроскопии и реализуют метод eddy-covariance (вихревой ковариации) измерения скорости обмена ПГ между атмосферой и подстилающей поверхностью. Опираясь на имеющиеся заделы, МФТИ планирует разработку и организацию серийного производства аппаратуры, которая бы могла успешно конкурировать с указанными

производителями как на российском, так и на зарубежных рынках.

В МФТИ разработан спектрометрический комплекс (далее СК) на основе многоканального лазерного гетеродинного спектрометра ближнего инфракрасного диапазона, обладающего на сегодняшний день рекордными спектральными и метрологическими характеристиками. СК проводит измерения в режиме прямых наблюдений Солнца и позволяет измерять величину интегральной концентрации ПГ с точностью около 0,2%, а также восстанавливать их распределение в тропосфере и нижней стратосфере. Также СК позволяет осуществлять дистанционное аэрологическое зондирование атмосферы, включая восстановление профиля скорости воздушных потоков, без применения аэростатных зондов. Стоимость СК в 7 раз ниже, чем у зарубежных аналогов, применяемых для наземной валидации и мониторинга содержания ПГ в атмосфере. Разработка защищена патентами и опубликована в престижных международных журналах.

В настоящее время разработана компактная версия СК для полевых исследований, которая проходит приемочные испытания совместно с Росгидрометом. Презентация прибора прошла на международном форуме «Армия-2021» 22-28 августа 2021 г. в составе комплекса оперативного мониторинга природных территорий на стенде МФТИ.

Действующий
экспериментальный
образец СК



СПЕКТРОМЕТРИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ МОНИТОРИНГА СОДЕРЖАНИЯ ПАРНИКОВЫХ ГАЗОВ

В МФТИ также разработан лазерный газоанализатор для дистанционного обнаружения источников метана, в частности, для мониторинга нештатных ситуаций на газотранспортных магистралях и других техногенных объектах. Прибор также может применяться для мониторинга природных источников эмиссии метана – болот, вечной мерзлоты, водных объектов, содержащих газогидраты. Спектрометр обладает конкурентоспособными характеристиками – чувствительность 50 ppb·м при дистанции 100 м и массой 3,5 кг, что превосходит доступные в России аналоги, в частности, разработки компании «Пергам инжиниринг».

В рамках СЧ ОКР «М-ДЛС-Электроника» МФТИ в кооперации с ИКИ РАН был разработан и сдан заказчику лазерный спектрометр М-ДЛС, вошедший в состав комплекса научной аппаратуры российской посадочной платформы «Казачок» международного проекта «ЭкзоМарс». В 2020 г. летному образцу спектрометра была присвоена литера «01», в настоящее время прибор в составе российского комплекса научной аппаратуры проходит испытания на площадке Европейского космического агентства. В спектрометре впервые для бортовой аналитической аппаратуры реализован метод полного резонансного выхода (ICOS), позволивший достичь высокой чувствительности и обеспечить измерения изотопного со-

става атмосферы с требуемой точностью. Разработка защищена патентами и опубликована в международных журналах. Адаптация разработки для применения на борту БПЛА-ВТ позволит осуществлять измерения концентраций ПГ и их изотопологов на различных уровнях атмосферного пограничного слоя и нижней тропосферы, не прибегая к дорогостоящим методикам измерений на специальных вышках.

В рамках программы оснащения карбоновых полигонов МФТИ разрабатывает лазерные газоанализаторы, реализующие метод турбулентных пульсаций, для замещения как на российском, так и на международных рынках аппаратуры американских компаний Picarro и Li-COR. Объем российского рынка оценивается в 10 млрд руб. Достигнута договоренность с Минобрнауки РФ о размещении аппаратуры МФТИ на пилотных карбоновых полигонах для кросс-калибровок и дальнейшей сертификации аппаратуры и методик измерений. Сертификация оборудования разработки МФТИ как на национальном, так и на международном уровне будет проходить при участии РГТМУ.

Партнерами МФТИ являются Минприроды России, Росгидромет, ИГКЭ им. Ю.А.Израэля, ИКИ РАН, компании «Большая Тройка», «МФТИ АЭРО». Кроме приборной базы и методик обработки и интерпретации данных измерений, МФТИ берет на себя численное моделирование процессов переноса климатически активных веществ в атмосфере и гидросфере, а также взаимодействия атмосферы с подстилающей поверхностью.



Метанометр

МЕРОПРИЯТИЯ КАРБОНОВЫХ ПОЛИГОНОВ, ЗАПЛАНИРОВАННЫЕ НА 2023 ГОД



Квартал	Мероприятие
1 квартал	Хакатон «Технологии декарбонизации», Евразийский Карбоновый полигон, Башкортостан
2 квартал	«Лесная школа 2023», Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г.Ф. Морозова, Воронежский полигон
	Круглый стол «Глобальные изменения климата и углеродное регулирование», г. Ханты-Мансийск, Югорский государственный университет, карбоновый полигон Мухрино
	Курсы повышения квалификации «Опыт организации работы и техническое оснащение карбонового полигона», 01–05 июня, г. Ханты-Мансийск, Югорский государственный университет, карбоновый полигон «Мухрино»
	Летняя молодежная школа по карбоновой тематике «CO2-tech», 01-05 июня, г. Ханты-Мансийск, Югорский государственный университет, карбоновый полигон «Мухрино»
	Круглый стол «Роль молодых ученых в реализации проекта карбоновых полигонов» в рамках Международной научной конференции студентов, аспирантов и молодых учёных «Ломоносов-2023»
	Летняя экологическая школа на Карбоновом полигоне WAY CARBON для студентов и старшеклассников
Международная конференция «Морские карбоновые полигоны: мониторинг и технологии», карбоновый полигон «Геленджик»	
Практическая молодежная научная школа «Методы научных исследований в оценке качества и безопасности водных биоресурсов, среды их обитания и углеродного баланса морских экосистем», Институт океанологии Российской академии наук, карбонового полигона «Геленджик»	

Квартал	Мероприятие
3 квартал	Международный лесной форум «Лес и климат: проблемы, угрозы, перспективы» Воронежский полигон
	Вторая летняя почвенно-экологическая школа "Carbon.MSU" для школьников
	Международная летняя школа «Береговая зона моря: управление, исследования и перспективы на морской площадке карбонового полигона в Калининградской области»
	Выездной полевой семинар для студентов, посвященный исследованиям на сухопутной площадке карбонового полигона, торфяник Витгирренский, полигон «Росьянка»
	Сессия программы дополнительного профессионального образования «Мониторинг и контроль климатически активных газов», Калининград, полигон «Росьянка»
	Симпозиум «Климатические изменения и карбоновые полигоны» в рамках 13-й Всероссийской научно-технической конференции «Современные проблемы геологии и геофизики Северного Кавказа», полигон WAY CARBON
	2-я Всероссийская конференция молодых ученых и аспирантов (школа-интенсив) «Глобальные и региональные изменения климата. Экологические вызовы» – 3-й квартал, г. Грозный, полигон WAY CARBON
	Летняя школа "Климатические карбоновые исследования в прибрежной зоне" для студентов и аспирантов, карбоновый полигон «Геленджик».
	Региональная конференция «Исследование углеродного цикла и проблемы декарбонизации Краснодарского края: подходы к масштабированию» совместно с КубГУ, КубГАУ, ФИЦ ШЦ, Южно-Российским НОЦ, карбоновый полигон «Геленджик».
	VIII Всероссийская полевая школа по почвенной зоологии и экологии для молодых ученых «Генетические технологии в регенеративном землепользовании» (ТюмГУ, Институт экологии и эволюции им. А.Н.Северцова РАН, проект ФНТП развития генетических технологий в РФ на 2019-2027 гг.)
4 квартал	Молодежный фестиваль «PRO-климат», Евразийский Карбоновый полигон, Башкортостан
	Международная научно-практическая конференция «Регенеративное земледелие в контексте климатической повестки: состояние, проблемы и перспективы развития» на базе ЧГУ им. А.А. Кадырова
	VI Международный кавказский экологический форум, г. Грозный, на базе ЧГУ им. А.А. Кадырова
	Всероссийский климатический форум. Евразийский Карбоновый полигон, Башкортостан
	III Молодежная школа-конференция "Урал-Карбон", III-IV квартал, УрФУ, Екатеринбург.
Научно-молодежная школа-конференция «Устойчивое управление прибрежными островными геосистемами как основа сохранения углеродного баланса и биоразнообразия» на базе карбонового полигона Сахалинской области.	

«FOR&ST CARBON»

Воронежская область
лес, пашни, мелиоративные насаждения

181.3 ГА

«ЕВРАЗИЙСКИЙ
КАРБОНОВЫЙ ПОЛИГОН»

Республика Башкортостан
ковыльная степь, залежные земли, леса, болота

11599.5

«РОСЯНКА»

Калининградская область
Торфяник, с/х земли, море

255,4 ГА

«УРАЛ-КАРБОН»

Свердловская область
Таёжные леса

606 ГА

«МУХРИНО»

Ханты-Мансийский автономный округ
Болото, лес, озера

1573,4 ГА

«WAY CARBON»

Чеченская Республика
Горы, лес, степь, пастбища

1785 ГА

«ЧАШНИКОВО»

Московская область
Смешанный лес, с/х земли

605,9 ГА

«КАЛУЖСКИЙ»

Калужская область
С/х земли, смешанный лес

600 ГА

«БИОКАРБОН»

Новосибирская область
Равнинная лесостепь, предгорная подтайга

1008 ГА

«ГЕЛЕНДЖИК»

Краснодарский край
Лес, водоём

26 ГА

«СЕМЬ ЛИСТВЕННИЦ»

Ямало-Ненецкий автономный округ
Лесотундра

2395 ГА

«ТОМСКИЙ
КАРБОНОВЫЙ ПОЛИГОН»

Томская область
Болотные, лесные и пойменные территории

450 ГА

«КАРБОН-ПОВОЛЖЬЕ»

Республика Татарстан
Лес, реки, водохранилища

60 ГА

«КАРБОН-САХАЛИН»

Сахалинская область
Прибрежная территория, море

4004 ГА

«ТЮМЕНСКИЙ
КАРБОНОВЫЙ ПОЛИГОН»

Тюменская область
Смешанный лес, водоём

10 670 ГА

carbon-polygons.ru

 CarbonPolygon



Карбоновые Полигоны
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ



Институт океанологии им. П.П. Ширшова
Российской Академии Наук



ИНКОНСАЛТ

По заказу Министерства науки и высшего образования
Российской Федерации