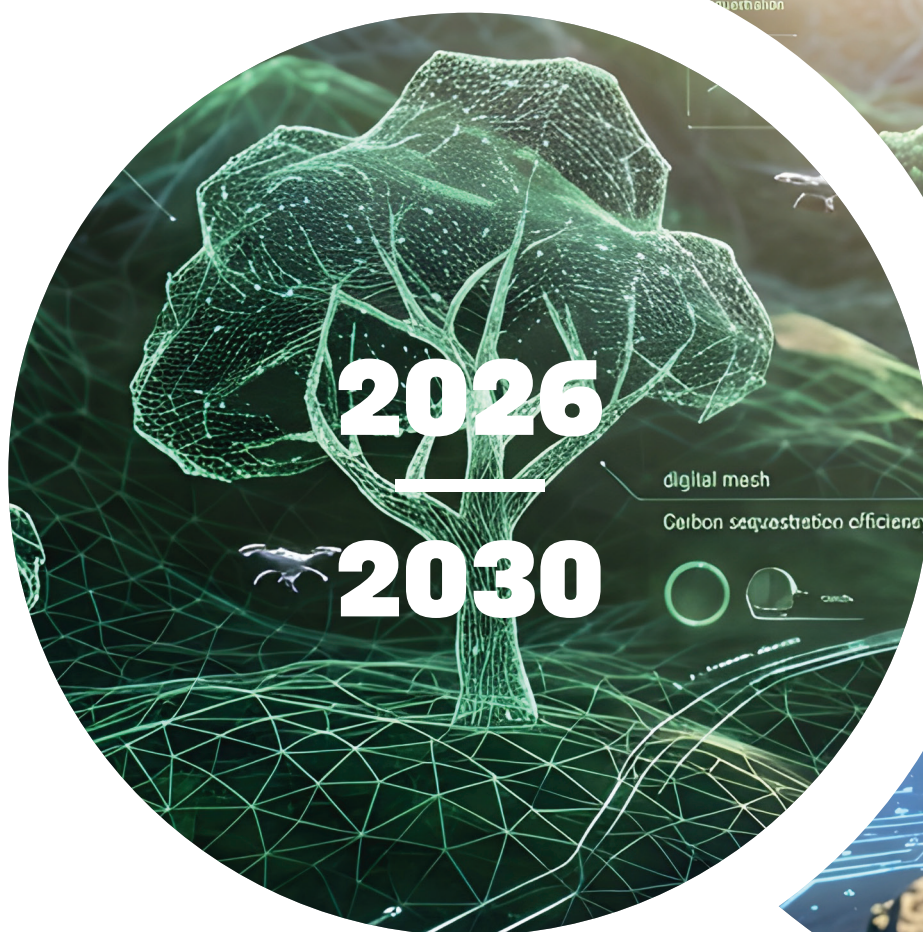




КОНЦЕПЦИЯ РАЗВИТИЯ СЕТИ КАРБОНОВЫХ ПОЛИГОНОВ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

на 2026-2030 годы



Министерство науки и высшего образования РФ
Институт океанологии им П.П. Ширшова РАН



КОНЦЕПЦИЯ РАЗВИТИЯ СЕТИ КАРБОНОВЫХ ПОЛИГОНОВ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ НА 2026-2030 ГОДЫ

С.К. Гулев, Н.Д. Дурманов, А.В. Ольчев,
М.В. Криницкий, В.П. Терещенков



В.Н. Фальков

Министр науки и высшего образования
Российской Федерации

В рамках пилотного проекта «Карбоновые полигоны» в период 2021-2026 гг. мы развернули уникальную исследовательскую инфраструктуру для мониторинга потоков парниковых газов в наиболее представительных с точки зрения суммарных потоков экосистемах России.

Сегодня пришло время определить дальнейшее развитие проекта «Карбоновые полигоны» и сформировать на базе созданной сети систему для получения достоверных данных о функционировании природных и антропогенно измененных экосистем для принятия научно обоснованных решений в области климатической политики, адаптации к изменениям климата, управления природными ресурсами и низкоуглеродного развития.

Цель настоящей концепции — определить дальнейшее развитие проекта «Карбоновые полигоны» и сформировать национальную научно-технологическую инфраструктуру для получения достоверных данных о функционировании природных и антропогенно измененных экосистем, моделирования климатически значимых процессов и разработки научно обоснованных решений в области климатической политики, адаптации к изменениям климата, управления природными ресурсами и низкоуглеродного развития.

Достижение этой цели предполагает трансформацию существующей сети карбоновых в единую распределенную платформу, объединяющую долгосрочный мониторинг, комплексные экосистемные исследования, цифровую инфраструктуру, математическое моделирование, разработку, апробацию и внедрение технологий и решений в области устойчивого управления природными ресурсами.

A handwritten signature in blue ink, consisting of stylized, overlapping loops and a long horizontal stroke extending to the right.

ОГЛАВЛЕНИЕ

	Резюме	9
01	Введение	13
02	Стратегия развития проекта “Карбоновые полигоны”	15
	2.1 Организационная и инфраструктурная трансформация сети карбоновых полигонов	15
	2.2 Ключевые текущие направления работ на карбоновых полигонах, их расширение и оптимизация	17
	2.2.1 Расширение системы мониторинга потоков климатически активных газов	
	2.2.2 Географическое расширение сети мониторинга	
	2.2.3 Апробация секвестрационных технологий и развитие природно-климатических проектов	
	2.2.4 Интеграция карбоновых полигонов в систему учета углеродного следа сельскохозяйственной продукции	
03	Создание единой цифровой платформы проекта	25
	3.1 Назначение и общая концепция Единой цифровой платформы	
	3.2 Первый уровень платформы: инфраструктура данных Экспертного центра и система CDCS	26
	3.2.1 Прием и накопление природных данных	
	3.2.2 Интеллектуальное сопровождение и формирование метаданных	
	3.2.3 Классификация, единая система типов и гармонизация данных	
	3.2.4 Представление, поиск и программный доступ к данным	
	3.3 Второй уровень платформы: сеть Центров разработки продуктовых и аналитических решений	28
	3.3.1 Организационный принцип сети Центров разработки	
	3.3.2 Взаимодействие Центров разработки с ЭЦ/CDCS	
	3.4 Производные аналитические и продуктовые решения	29
	3.4.1 Аналитические продукты	
	3.4.2 Научные информационные продукты	
	3.4.3 Расчетные и модельные продукты	

04

Развитие моделирования потоков климатически активных газов и создание цифровых двойников экосистем	37
4.1 Роль моделирования и развития программы карбоновых полигонов	37
4.2 Критические аспекты развития моделирования	37
4.2.1 Процесс-ориентированные и регионально-ориентированные модели	
4.2.2 Моделирование обратных связей в экосистемах	
4.2.3 Особенности развития моделирования для различных типов ландшафтов	
4.2.4 Метагеномные данные как обязательный элемент параметризации моделей	
4.3 Расширение функционала используемых моделей	41
4.3.1 От моделирования углеродного цикла к полноценным экосистемным моделям	

	4.3.2 Пространственно-временное масштабирование	
	4.3.3 Инверсионное моделирование	
	4.3.4 Использование искусственного интеллекта в моделировании	
	4.4 Создание цифровых двойников экосистем	42
	4.4.1 Моделирование как путь к созданию цифровых двойников экосистем	
	4.4.2 Взаимосвязь и взаимообусловленность различных блоков развития моделирования в рамках проекта	
05	Перспективные направления исследований, создание новых технологических решений	45
	5.1 Метагеномика и функциональная геномика почв	45
	5.2 Геномные банки и селекция суперпоглопителей	46
	5.3 Мониторинг биоразнообразия методами eDNA	46
	5.4 Метагеномика почв и подход “Единое здоровье” (One Health) для комплексной оценки агроэкосистем	47
	5.5 Развитие технологий циркулярной биоэкономики	47
	5.6 Использование потенциала ботанических садов для создания дополнительных площадок наблюдений и реализации новых направлений в работе проекта карбоновых полигонов	48
06	Участие полигонов в разработке и актуализации региональных планов адаптации к изменениям климата	49
	6.1 Обоснование связи задач карбоновых полигонов с разработкой и актуализацией региональных планов адаптации к изменениям климата	49
	6.2 Основные направления участия карбоновых полигонов в разработке и актуализации планов адаптации	50
07	Подготовка кадров для климатической экономики	51
	7.1 Новые магистерские программы	51
	7.1.1 Экосистемный мониторинг и управление природными территориями	
	7.1.2 Почвы, биогеохимические циклы и климат	
	7.1.3 Гидроэкология и климатическая устойчивость ландшафтов	
	7.1.4 Биоразнообразие, ДНК-мониторинг и эко системная диагностика	
	7.1.5 Устойчивое землепользование и природоориентированные решения	
	7.1.6 Экологические данные, ИИ и цифровые двойники экосистем	

	7.2. Новые бакалаврские программы	52
	7.3. Сетевые и модульные форматы, которые предстоит заложить во все программы	53
	7.4 Программы дистанционного обучения	53
	7.5 Образовательные треки для школьников	54
08	Международное сотрудничество в рамках программы "зеркальных" карбоновых полигонов	55
09	Ожидаемые результаты	59
10	Заключение	61



РЕЗЮМЕ

Главная цель разработанной концепции на 2026–2030 годы — трансформация существующей сети из совокупности локальных станций в единую национальную распределенную научно-технологическую инфраструктуру, обеспечивающую полный цикл: от сбора первичных данных и математического моделирования до верификации климатических проектов и интеграции в государственную климатическую политику.

Концепция определяет стратегические направления развития и трансформация сети. Такая трансформация предполагает сквозную технологическую цепочку: стандартизация — сбор и контроль качества — моделирование — масштабирование — прикладных продуктов — внедрение в хозяйственную практику.

Основными направлениями являются следующие:

- **Расширение мониторинга:** Развертывание мониторинга малых климатически активных газов (включая N_2O , озон, фторированные и галогенсодержащие газы, SF_6 , ПФУ, ГФУ) на специализированных промышленных полигонах.
- **Географическая экспансия:** Освоение слабо исследованных районов полярных/субполярных широт, Центральной и Восточной Сибири, зоны сплошного и прерывистого залегания многолетней мерзлоты, шельфовых зон, внутренних водоемов, а также развертывание специализированных городских карбоновых полигонов.
- **Природно-климатические проекты (ПКП) и секвестрация:** Перенос фокуса с чисто коммерческой генерации углеродных единиц (по статьям 6.2/6.4 Парижского соглашения, CORSIA) на комплексную экосистемную оценку (включая поверхностное альбедо, водный и тепловой баланс, сохранение биоразнообразия и приоритет аборигенных видов).
- **Интеграция с агросектором:** Участие в формировании методик Минсельхоза и реестра Минэкономразвития РФ по учету углеродного следа сельхозпродукции (зерновые, масличные, животноводство) по стандарту ISO 14067.

Важным направлением развития является создание единой цифровой платформы проекта. Такая платформа строится как двухуровневая распределенная система с четкой правовой моделью (трехсторонние соглашения, режимы доступа: публичный, регламентированный, государственный; институты эмбарго и атрибуции авторства).

Предлагается двухуровневая структура платформы:

- Первый уровень (Инфраструктура данных ЭЦ на базе ИО РАН и система CDCS): Безбарьерный прием разнородных сырых данных без принудительной унификации, диалоговое сопровождение с метаданными на базе ИИ/LLM, последующая классификация и гармонизация стандартизируемых массивов.
- Второй уровень (Сеть Центров разработки): Организации или их структурные подразделения, разрабатывающие на основе API-доступа модельные расчеты, геоинформационные слои, системы поддержки принятия решений (СППР), калькуляторы углеродного следа и прикладные решения.

Важным сквозным направлением трансформации проекта является развитие моделирования, машинного обучения и создание цифровых двойников экосистем. Это позволит преодолеть ограничения пространственной дискретности точечных измерений и выйти на получение интегральных оценок.

Концепция предлагает следующие направления развития моделирования:

- Процесс-ориентированные и континуальные модели: Сопряжение углеродного и азотного циклов, учет мерзлотных процессов и сопряжение по цепочке «водосбор — река — водоем — шельф — атмосфера».
- Параметризация метагеномными данными: Прямая калибровка потоков CH_4 и N_2O через активность и экспрессию ключевых генов микробиоты (*mcrA*, *pmoA*, *nosZ*).
- Инверсионное и гибридное моделирование: Восстановление источников и стоков по спутниковым и высотным данным с оценкой неопределенности; интеграция физических законов с нейросетевыми моделями (Data-driven approaches).
- Цифровые двойники экосистем: Создание динамических моделей типовых ландшафтов (бореальные леса на мерзлоте, агроценозы, болотные массивы) для проведения «виртуальных экспериментов» и сценарного прогнозирования.

Концепция предлагает развитие новых перспективных научных направлений и технологий, которые позволят обеспечить трансформацию полигонов в комплексные экосистемные лаборатории.

Основными направлениями деятельности в этой части являются:

- Метагеномика и eDNA: Картирование почвенной микробиоты, ранняя диагностика патогенов и мониторинг биоразнообразия по следовой ДНК (eDNA).
- Селекция «суперпоглопителей»: Формирование геномных банков и клональное микроразмножение быстрорастущих депонирующих пород (тополь, триплоидная осина, мискантус, павловния).

- Циркулярная биоэкономика: Пиролиз сельхозотходов с получением биоугля, биореакторы для навоза, культивация морских макрофитов (ламинария) для депонирования углерода.
- Ботанические сады: Использование коллекций садов в качестве полигонных площадок для калибровки генетических параметров секвестрации.

Концепция также предлагает активное участие полигонов в формировании и актуализации региональных планов адаптации к климатическим изменениям. В частности, операторы полигонов могут обеспечить предоставление объективных рядов наблюдений и моделей рисков для актуализации региональных планов адаптации субъектов РФ (в сельском, лесном, водном хозяйствах и зонах мерзлоты), разработку и проверку климатически нейтральных технологий, развиваемых на региональном уровне, а также поддержку регионального управления и отчетности.

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, геоинформационные технологии, технологии проведения измерений, искусственный интеллект и т.д. В ходе развития проекта в 2026–2030 гг. предполагается развертывание 6 новых профильных магистерских программ (экомониторинг, биогеохимия почв, гидроэкология, ДНК-диагностика, устойчивое землепользование, цифровые двойники/ИИ), 5 бакалаврских треков, сетевых модулей (университет — полигон — лаборатория) и программ ранней профориентации школьников.

В рамках проекта карбоновых полигонов Российской Федерации в 2024 году начала реализовываться программа формирования «зеркальных» карбоновых полигонов как специализированного механизма международного научно-технологического сотрудничества. Развитие проекта предполагает расширение международного сотрудничества и присутствия (действующие площадки в Бразилии, Сербии, Боснии и Герцеговине; готовящиеся проекты в Казахстане, Азербайджане, ЮАР) для взаимного признания методологий, трансфера отечественного оборудования и продвижения углеродных единиц.

Концепция также определяет целевые показатели эффективности трансформации проекта к 2028 г. в области создания технологических решений, кадровой политики, внедрения разработанных технологий секвестрации, уточнения национальных коэффициентов поглощения/эмиссии для Национального кадастра антропогенных выбросов и поглотителей парниковых газов РФ, а также получения научных результатов.

Представленная Концепция развития сети карбоновых полигонов на 2026–2030 годы формирует новую модель дальнейшего развития проекта, основанную на переходе от преимущественно локальной системы наблюдений потоков парниковых газов к распределенной научно-технологической инфраструктуре, обеспечивающей получение, накопление, интеграцию и практическое использование данных о функционировании природных и антропогенно измененных экосистем.



В рамках пилотного проекта «Карбоновые полигоны» в период 2021—2026 годов развернута уникальная исследовательская инфраструктура для мониторинга потоков парниковых газов в наиболее представительных с точки зрения суммарных потоков экосистемах России. Созданная инфраструктура включает разработки технологий снижения выбросов и повышения секвестрации парниковых газов. Кроме того, практически на всех полигонах ведутся работы в части подготовки кадров для работ в области мониторинга потоков парниковых газов.

В настоящее время карбоновые полигоны осуществляют деятельность на территории 20 субъектов Российской Федерации в различных природных системах (лесных, болотных, морских прибрежных и пресноводных внутренних водоемов, агроландшафтов и др.). Объем выделенного бюджетного финансирования за 2021-2026 годы составляет 5,1 млрд рублей. Из них на создание и развитие новой передовой инфраструктуры было потрачено 1,8 млрд рублей, а дополнительно организациями было привлечено внебюджетное финансирование в размере более 1,7 млрд рублей.

На всех полигонах проводятся прецизионные измерения потоков основных климатически активных — парниковых — газов, а также потоков тепла, влаги и импульса. Эти измерения сопровождаются контролем основных метеорологических параметров, а также радиационного баланса земной поверхности.

Измерения потоков парниковых газов обеспечиваются сетью наземных сенсоров, включая как пульсационные системы, так и камерные наблюдения высокоточными комплексами метеонаблюдений, а также дистанционными наблюдениями с использованием беспилотных летательных аппаратов, оснащенных необходимым набором сенсорной аппаратуры – мульти- и гиперспектральными камерами, радарными, лидарами, газоанализаторами и пр. Практически все полигоны также используют доступные измерения потоков климатически активных газов со спутников.

На середину 2026 года карбоновые полигоны России были оборудованы:

- метеорологическим оборудованием (по стандартам ВМО) – более 50 единиц,
- оборудованием для пульсационных и камерных измерений потоков парниковых газов – более 80 единиц,
- оборудование для дистанционных измерений параметров растительности, почвы (включая лидарную съемку), а также концентраций парниковых газов – 48 единиц,
- иным необходимым оборудованием (измерение концентраций парниковых газов, элементные анализаторы, оборудование для измерения фотосинтеза и дыхания, проведения геномного анализа и др.) – более 180 единиц.

Будучи научно-образовательными структурами, полигоны также служат формированию 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. В общей сложности с начала реализации проекта по программам высшего образования и дополнительного образования, разработанными операторами карбоновых полигонов, обучалось более 2800 человек.

Цель настоящей концепции – определить дальнейшее развитие проекта «Карбоновые полигоны» и сформировать на базе созданной сети национальную распределенную научно-технологическую инфраструктуру для получения достоверных данных о функционировании природных и антропогенно измененных экосистем, моделирования климатически значимых процессов и разработки научно обоснованных решений в области климатической политики, адаптации к изменениям климата, управления природными ресурсами и низкоуглеродного развития.

Достижение этой цели предполагает трансформацию существующей сети карбоновых полигонов из преимущественно совокупности станций и исследовательских площадок наблюдений в единую распределенную платформу, объединяющую долгосрочный

мониторинг, комплексные экосистемные исследования, цифровую инфраструктуру, математическое моделирование, разработку, апробацию и внедрение технологий и решений в области устойчивого управления природными ресурсами.

Такая трансформация должна обеспечить переход от преимущественно локального получения данных к формированию единой технологической цепочки, включающей получение и контроль качества первичных данных, их консолидацию и хранение, интеграцию с данными дистанционного зондирования и другими источниками информации, математическое моделирование и пространственно-временное масштабирование результатов, создание научных и прикладных продуктов, а также их использование при разработке технологических, управленческих и хозяйственных решений.

Это определяет направление проекта на обеспечение достоверности и сопоставимости данных наблюдений, развитие современных методов моделирования и цифровых технологий, разработку и апробацию решений в области устойчивого управления природными ресурсами и низкоуглеродного развития, подготовку кадров нового типа, а также обеспечение технологической независимости в области климатического мониторинга и природоподобных технологий.

“

Развитие проекта “Карбоновые полигоны” способствует разработке научно обоснованных решений в области климатической политики, адаптации к изменениям климата, управления природными ресурсами и низкоуглеродного развития.

02

СТРАТЕГИЯ РАЗВИТИЯ ПРОЕКТА КАРБОНОВЫЕ ПОЛИГОНЫ



2.1 ОРГАНИЗАЦИОННАЯ И ИНФРАСТРУКТУРНАЯ ТРАНСФОРМАЦИЯ СЕТИ КАРБОНОВЫХ ПОЛИГОНОВ

Реализация стратегической цели развития проекта требует последовательной организационной и инфраструктурной трансформации существующей сети карбоновых полигонов. Основной задачей данной трансформации является формирование единой распределенной системы, обеспечивающей получение сопоставимых и достоверных данных, их накопление и интеграцию, развитие методов моделирования, создание научных и прикладных продуктов и практическое использование результатов исследований.

В настоящее время технологии мониторинга, в том числе прямые и косвенные методы определения потоков парниковых газов на полигонах, уже используются в оперативном режиме, однако дальнейшее развитие системы требует обеспечения постоянной сопоставимости, контроля качества и верификации получаемых данных. Получение непрерывных и сопоставимых рядов измерений, выполненных на основе согласованных и международно признанных методических подходов, является необходимым условием получения научно значимых и практически применимых результатов.

В части разработки и применения математических моделей интеграции данных дистанционного зондирования Земли и наземных измерений с использованием

физически обоснованных подходов имеются значимые успехи, однако задача взаимного сопоставления и валидации существующих моделей остается приоритетной. При этом дальнейшее развитие сети должно быть направлено не только на совершенствование отдельных методов наблюдений или моделирования, но и на обеспечение их функционирования в рамках единого научно-технологического контура. В такой системе результаты наблюдений должны последовательно проходить этапы контроля качества, накопления и интеграции, использоваться для разработки и верификации моделей, пространственно-временного масштабирования получаемых оценок и создания научных, технологических и прикладных продуктов.

Учитывая сегодняшнее состояние систем наблюдений и развития моделирования на полигонах, для повышения эффективности работы сети карбоновых полигонов наиболее важным является обеспечение следующих направлений деятельности.

- Обеспечение квазиоперативного сбора, консолидации и контроля качества данных наблюдений на карбоновых полигонах и формирование консолидированного архива данных. Созданная в настоящее время система передачи и консолидации данных проходит период тестирования и после доработки станет унифицированным информационным ресурсом проекта. В рамках формирования данного ресурса предполагается доработка единых стандартов (протоколов) сбора,

обработки, хранения и обмена данными для обеспечения их сопоставимости и верифицируемости.

- Определение принципов правового регулирования передачи данных, доступа к ним, правил их обмена между участниками проекта и внешними потребителями, регулирования прав на создание научных и прикладных продуктов, основанных на данных проекта.
- Развитие и верификация методов интеграции наземных наблюдений, данных дистанционного зондирования и математического моделирования. Данное направление должно обеспечить переход от анализа локальных результатов измерений к получению пространственно распределенных оценок потоков климатически активных газов и других характеристик состояния экосистем, а также к оценке неопределенности получаемых результатов.
- Анализ и адаптация лучших мировых практик в части измерений потоков климатически активных газов и углеродного баланса в разных условиях для обеспечения сопоставимости российских методик, моделей и производных продуктов.
- Разработка механизмов преобразования результатов наблюдений и моделирования в научные, аналитические, технологические и прикладные продукты. Это предполагает создание условий для использования накопленных данных и результатов исследований при разработке природоориентированных решений, технологий повышения секвестрации углерода, инструментов оценки состояния экосистем, а также других решений в области устойчивого управления природными ресурсами.
- Внедрение разработанных методик, моделей, оценок и технологических решений в научную, управленческую и хозяйственную практику, обеспечивающее их практическую востребованность, формирование экономических эффектов и создание возможностей для привлечения промышленных партнеров к софинансированию деятельности карбоновых полигонов, в том числе в

части разработки и апробации технологий повышения секвестрации парниковых газов.

Указанные направления образуют взаимосвязанную систему, в которой мониторинг потоков климатически активных газов на карбоновых полигонах рассматривается не как самоцель, а как базовый элемент более широкой научно-технологической инфраструктуры.

Получение достоверных первичных данных является необходимым, но недостаточным условием для достижения целей проекта. Практическая значимость данных возникает в результате их последовательной интеграции с другими источниками информации, научной интерпретации, моделирования, пространственно-временного масштабирования и преобразования в научные, технологические и прикладные решения.

В этой связи дальнейшее развитие сети карбоновых полигонов должно обеспечивать формирование единой последовательности:

- развитие инфраструктуры и методической базы
- получение качественных и сопоставимых первичных данных
- контроль качества и накопление данных
- их интеграция с данными дистанционного зондирования и другими источниками информации
- математическое моделирование и верификация результатов
- создание научных и прикладных продуктов
- разработка и апробация технологических решений
- внедрение результатов в научную, управленческую и хозяйственную практику.



Такая организационная и инфраструктурная трансформация позволит перейти от функционирования отдельных исследовательских площадок к единой распределенной сети, в которой полигоны сохраняют свою природно-климатическую и научную специализацию, но действуют на основе согласованных методических подходов, единых принципов работы с данными и общих механизмов создания и практического использования результатов.

Для реализации данной модели в последующих разделах Концепции предусматривается развитие новых и расширение существующих направлений деятельности карбоновых полигонов. Их формирование должно осуществляться во взаимосвязи с базовыми задачами мониторинга и исследований и быть направлено на повышение научной, технологической и практической результативности всей сети.



2.2 КЛЮЧЕВЫЕ ТЕКУЩИЕ НАПРАВЛЕНИЯ РАБОТ НА КАРБОНОВЫХ ПОЛИГОНАХ, ИХ РАСШИРЕНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ

2.2.1 Расширение системы мониторинга потоков климатически активных газов

Ведущийся в настоящее время мониторинг потоков климатически активных газов обеспечивается пульсационными и камерными измерениями потоков CO_2 и CH_4 практически на всех полигонах. Измерения потоков N_2O , имеющие важное значение, в том числе для исследования агроландшафтов и водных экосистем, ведутся на ограниченном числе площадок.

Сохранение и дальнейшее развитие существующей системы наблюдений с обеспечением непрерывности измерений, повышением их сопоставимости и качества, а также расширением пространственного и временного охвата является одним из базовых приоритетов развития сети карбоновых полигонов. Измерения потоков климатически активных газов должны сопровождаться наблюдениями за основными метеорологическими параметрами, компонентами радиационного баланса, состоянием растительного и почвенного покрова, гидрологическими характеристиками и другими параметрами, необходимыми для интерпретации наблюдаемых потоков и их последующего моделирования.

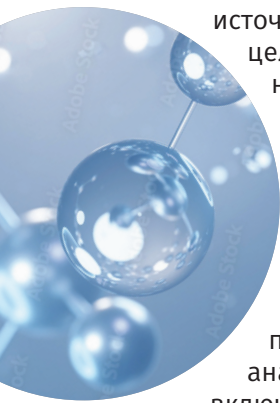
Одним из направлений дальнейшего развития системы мониторинга должно стать расширение спектра измеряемых газов и веществ, оказывающих существенное влияние на радиационный баланс атмосферы. При этом расширение набора наблюдений должно осуществляться с учетом природно-климатической специфики отдельных полигонов, особенностей исследуемых экосистем и наличия потенциально значимых источников или стоков соответствующих веществ.



Особое направление представляет развитие наблюдений за фторированными и другими галогенсодержащими газами.

Использование галогенсодержащих газов в промышленности и хозяйственной деятельности связано с широким применением в качестве хладагентов, рабочих тел, компонентов технологических процессов и других специализированных веществ. Несмотря на относительно небольшие концентрации в атмосфере, ряд таких соединений характеризуется значительным потенциалом глобального потепления и длительным временем пребывания в атмосфере.

В этой связи развитие наблюдений за фторированными парниковыми газами может стать одним из новых направлений деятельности отдельных карбоновых полигонов, прежде всего расположенных в регионах с высокой концентрацией промышленных, транспортных или иных потенциальных антропогенных



источников таких соединений. При этом целесообразно рассматривать данное направление не как обязательный элемент оснащения всех полигонов, а как специализированную функцию отдельных площадок, обладающих необходимой инфраструктурой, научной специализацией и аналитическими возможностями. Развитие данного направления потребует создания или модернизации аналитической инфраструктуры, включая применение хроматографических систем с соответствующими детекторами, масс-спектрометрических методов анализа и, в зависимости от задач наблюдений, методов лазерной абсорбционной спектроскопии.

В более широком контексте развитие системы мониторинга должно быть направлено на формирование комплексной системы наблюдений за климатически активными компонентами атмосферы и экосистем. Основу такой системы по-прежнему должны составлять измерения потоков CO_2 , CH_4 и N_2O , однако по мере развития научной и аналитической инфраструктуры отдельные полигоны могут быть специализированы на исследовании других парниковых газов и климатически активных веществ, включая озон, SF_6 , перфторуглероды и гидрофторуглероды.

При этом необходимо разграничивать задачи измерения потоков веществ между поверхностью и атмосферой и задачи атмосферного мониторинга их концентраций и переноса. Для ряда соединений, прежде всего имеющих преимущественно антропогенные источники, более информативным может быть развитие систем наблюдений за атмосферными концентрациями, их пространственным распределением и переносом, чем прямые измерения экосистемных потоков.

Отдельное значение имеет учет роли водяного пара, потоков тепла и влаги, а также компонентов радиационного баланса при интерпретации климатически значимых процессов. Хотя водяной пар является важнейшим естественным парниковым газом, в рамках деятельности полигонов его изучение целесообразно рассматривать прежде всего в контексте энерго- и влагообмена экосистем, формирования приземного слоя атмосферы и анализа обратных связей между состоянием экосистемы и климатической системой.

Таким образом, дальнейшее развитие системы мониторинга должно быть ориентировано не на механическое увеличение числа

измеряемых параметров на каждом полигоне, а на формирование распределенной системы специализированных наблюдений. При сохранении единого обязательного ядра измерений отдельные полигоны могут развивать дополнительные направления мониторинга в соответствии со своей природно-климатической спецификой, научной специализацией и ролью в общей системе наблюдений.

2.2.2 Географическое расширение сети мониторинга

Учитывая ограниченность доступного финансирования новых полигонов, важно сосредоточиться на расширении сети мониторинговых станций по измерению потоков парниковых газов в слабо исследованных экосистемах полярных и субполярных широт, территории Центральной и Восточной Сибири, а также в засушливых (аридных) и полусухих (семиаридных) регионах, характеризующихся высокой чувствительностью экосистем к изменениям климатических и антропогенных факторов. Приоритет при выборе новых площадок должен определяться не только недостаточной изученностью территории, но и ее значимостью для регионального и национального баланса климатически активных газов, представленностью ключевых природных экосистем, наличием существенных пространственных пробелов в существующей сети наблюдений и возможностью обеспечения долгосрочной непрерывности измерений.

Прежде всего, новые планируемые полигоны должны быть ориентированы на определение характерных для слабо нарушенных природных экосистем уровней и диапазонов пространственно-временной изменчивости потоков парниковых газов, что в дальнейшем может быть использовано как для оценки пространственной изменчивости потоков в масштабе России, так и для определения базовых природных состояний и условий, к которым стоит стремиться при реализации природно-климатических проектов и оценке степени нарушенности природных ландшафтов вследствие человеческой деятельности.

При этом формирование сети фоновых и слабо нарушенных площадок должно быть ориентировано на создание пространственно репрезентативной системы наблюдений, результаты которой могут использоваться не только для характеристики отдельных территорий, но и для верификации и калибровки математических моделей,

пространственного масштабирования результатов локальных измерений и формирования региональных и национальных оценок.

Отдельным направлением развития сети карбоновых полигонов должно стать создание и развитие площадок для комплексной оценки процессов деградации земель и связанных с ними изменений углеродного, водного и энергетического баланса экосистем. Такие площадки целесообразно развивать прежде всего в регионах, характеризующихся высокой степенью антропогенной нагрузки, опустыниванием, деградацией почв, нарушением растительного покрова и другими формами трансформации земель. Получаемые данные должны использоваться для оценки масштабов и динамики деградационных процессов, их влияния на потоки климатически активных газов, а также для разработки и апробации мер по восстановлению экосистем и устойчивому управлению земельными ресурсами.

Особое внимание при расширении сети наблюдений стоит обратить на зону сплошного, прерывистого и островного распространения многолетней мерзлоты. При этом целесообразно обеспечить представление в сети различных типов мерзлотных ландшафтов и различной степени их антропогенной нарушенности, что позволит исследовать пространственную неоднородность климатически значимых процессов и реакцию различных на изменение температурного и гидрологического режимов.

При определении фонового распределения потоков парниковых газов на территории России в исследованиях стоит обратить особое внимание на прибрежные шельфовые зоны, а также акватории крупных внутренних водоемов. Эти территории характеризуются значительной пространственной неоднородностью и недостаточной обеспеченностью регулярными долгосрочными наблюдениями, при этом их вклад в региональный и национальный баланс климатически активных газов требует дальнейшего уточнения.

Современные технологии природно-климатических решений не предполагают эффективную реализацию мероприятий по смягчению последствий современных

климатических изменений на данных территориях. Однако комплексные знания о пространственной и временной изменчивости потоков парниковых газов на данных объектах, не ограничивающиеся разовыми их измерениями, могут иметь ключевое значение для формирования целостной картины вклада водных экосистем в региональный и глобальный баланс парниковых газов. Поэтому развитие наблюдений в водных и прибрежно-шельфовых экосистемах следует рассматривать прежде всего как научно-инфраструктурную задачу, направленную на устранение существующих пробелов в системе мониторинга и повышение достоверности пространственно распределенных оценок.

До настоящего времени объектом исследования пилотного проекта являлись исключительно природные экосистемы. Высокий уровень урбанизации отдельных регионов России поднимает вопрос о необходимости исследований и развития технологий по управлению углеродным и тепловым балансом и городских и сельских агломераций, прежде всего в контексте их роли в регулировании обмена парниковыми газами с атмосферой.

Перспективным направлением развития сети может стать создание городских карбоновых полигонов, предназначенных для комплексного изучения углеродного, энергетического и теплового баланса урбанизированных территорий, а также оценки роли городской растительности, почв, водных объектов и элементов городской инфраструктуры в формировании потоков климатически активных газов и локального микроклимата.

Подобные исследования уже давно получили широкое распространение в мировой практике. Такие площадки для наблюдений могут являться достаточно экономичными и включать исследования и деятельность по созданию естественной среды обитания, обеспечивающей биоразнообразие животных и растений, созданию зеленых рекреационных зон для отдыха, охране водных ресурсов, развитию экологического транспорта, проведению мероприятий по ослаблению эффекта городского острова тепла.

При этом городские карбоновые полигоны целесообразно рассматривать не как расширение существующей системы природных полигонов по тому же принципу, а как отдельный специализированный тип исследовательских площадок с собственной системой наблюдений и набором решаемых задач. Их развитие позволит распространить методические

и технологические подходы проекта на территории с высокой концентрацией населения, инфраструктуры и антропогенных источников климатически активных газов.

При решении задач по оценке пространственной изменчивости потоков парниковых газов важно развивать новые технологии по применению средств дистанционного зондирования для определения и пространственного масштабирования приземных потоков парниковых газов в различном пространственном (от масштаба отдельных экосистем до регионального) и временном масштабе. Развитие таких методов должно осуществляться во взаимосвязи с сетью наземных наблюдений, поскольку данные карбоновых полигонов являются необходимой основой для калибровки, верификации и оценки неопределенности результатов дистанционного зондирования и моделирования.

Дополнительным направлением развития сети, прежде всего в агроландшафтных районах и на водосборных территориях, должно стать создание площадок для комплексной оценки взаимосвязи применяемых агротехнологий, состояния почв, формирования поверхностного и подземного стока, качества водных объектов и потоков климатически активных газов. Такие исследования позволят оценивать не только углеродный эффект применяемых технологий, но и их влияние на сохранение почвенных и водных ресурсов, а также на устойчивость агроэкосистем в целом.

“

Важный компонент исследований — развитие наземных и дистанционных методов мониторинга водных объектов и процессов переноса вещества с водосборов, включая оценку эвтрофикации пресноводных экосистем и верификацию математических моделей.



2.2.3 Апробация секвестрационных технологий и развитие природно-климатических проектов

Создание, развитие и апробация и развитие секвестрационных технологий является важнейшей задачей карбоновых полигонов. При этом ключевой функцией карбоновых полигонов должно являться не только создание, развитие и апробация таких технологий, но и научное сопровождение, количественная оценка и верификация достигаемого климатического эффекта.

Развитие национальных и отраслевых механизмов углеродного регулирования и международных механизмов сотрудничества в области сокращения выбросов и увеличения поглощения парниковых газов, включая реализацию статей 6.2 и 6.4 Парижского соглашения, CORSIA, и другие формирующиеся механизмы углеродного регулирования делает этот компонент работ на карбоновых полигонах крайне актуальным.

В ближайшие годы российским авиакомпаниям, а затем и компаниям — экспортерам углеродоемких товаров понадобятся миллионы углеродных единиц. Для обеспечения развития новой отрасли необходимы усилия по распространению знаний и подготовке кадров, правовому и нормативному регулированию, созданию цифровых инструментов, ускоряющих разработку ТЭО, проектной документации, методологий мониторинга и верификации. При этом формирование методологической и инструментальной базы природно-климатических проектов должно опираться на результаты долгосрочных наблюдений на карбоновых полигонах, а также на данные о пространственной и временной изменчивости потоков климатически активных газов в различных природных условиях.

Эти знания нельзя получить простым заимствованием, поскольку модели опираются на региональную природную и хозяйственную специфику и требуют проведения значительных научно-методических исследований для разработки и адаптации методологий, обеспечивающих достоверную оценку климатического эффекта проектов в конкретных природно-климатических условиях.

При реализации природно-климатических решений по смягчению последствий современных климатических изменений требуется рассматривать не только чисто экономические эффекты для компаний и

организаций, реализующих подобные проекты, но и подтверждение долговременного климатического и экологического эффекта. Природно-климатический проект должен рассматриваться не только как механизм генерации углеродных единиц, но и как комплекс мероприятий, направленных на долговременное снижение эмиссии и (или) увеличение поглощения парниковых газов при сохранении или повышении устойчивости природных экосистем.

“

Экономическая эффективность и возможность привлечения частных инвестиций при этом являются важными условиями масштабирования природно-климатических решений, однако не должны подменять собой основную цель — достижение измеримого, дополнительного и долговременного климатического эффекта.

При этом реализация природно-климатических проектов не должна привести к нарушению устойчивости экосистем, снижению естественного биоразнообразия, утрате экосистемных услуг и др. Разработка и оценка природно-климатических проектов должна основываться на комплексном анализе исходного состояния территории, выборе научно обоснованной базовой линии и организации долгосрочного мониторинга как самого объекта проекта, так и при необходимости сопоставимых фоновых или контрольных территорий.

При расчете углеродного следа должен выбираться «климат-ориентированный» алгоритм его расчета, включая адекватный выбор «базовой» линии климатического проекта. Она должна быть приближена к параметрам, характерным для естественных природных ландшафтов в данной природной зоне с учетом конкретного типа экосистемы, истории ее использования и степени антропогенной нарушенности. При этом базовая линия должна отражать наиболее вероятную динамику экосистемы при отсутствии реализации проекта и быть обоснована на основе результатов наблюдений, данных дистанционного зондирования, исторической информации и, при необходимости, математического моделирования.

Для обеспечения устойчивого развития природных экосистем и сохранения биоразнообразия при планировании природно-климатических проектов необходимо обеспечить приоритетное использование



аборигенных видов растений как наиболее адаптированных к местным ландшафтным условиям. Использование инвазивных видов растений требует проведения дополнительной комплексной экологической экспертизы с привлечением широкого круга специалистов. Возможна реинтродукция ранее исчезнувших из биоценоза видов растений. Карбоновые полигоны в этой системе могут выполнять функцию научно-экспериментальных площадок для апробации методических подходов к определению базовых линий, организации мониторинга, оценке дополнительности и долговременности климатического эффекта, а также анализу возможных экологических последствий реализации проектов.

Не менее важно, что при интерпретации и анализе выполнения природно-климатических проектов в будущем должны анализироваться не только баланс между эмиссией и поглощением парниковых газов, но также и вклад таких характеристик, как поверхностное альbedo, тепловой и водный баланс земной поверхности, аэрозольное загрязнение и др. в формирование регионального климатического эффекта. Таким образом, оценка результативности природно-климатических проектов должна, где это методически возможно, основываться на анализе полного комплекса биогеохимических и биофизических изменений, происходящих в экосистеме вследствие реализации проектных мероприятий.

Воздействие данных факторов на температурный режим земной поверхности может на порядки превышать влияние на радиационный баланс выбросов основных антропогенных парниковых газов (CO_2 , CH_4). Поэтому увеличение поглощения CO_2 или сокращение выбросов отдельных парниковых газов не всегда должно автоматически интерпретироваться как эквивалентный положительный климатический эффект без оценки возможных сопутствующих изменений альbedo, тепло- и влагообмена,

гидрологического режима и других процессов. Также, рассматривая в качестве своей основной задачи смягчение последствий климатических изменений, не стоит забывать, что климат – это не только многолетний режим приземной температуры, но также и многолетний режим осадков, ветровой режим, режим облачности и др. В этой связи при разработке и оценке секвестрационных технологий и природно-климатических решений необходимо учитывать возможные изменения не только углеродного баланса, но и других характеристик климатической системы и состояния экосистем.

Лишь комплексный анализ всего многообразия факторов и возникающих причинно-следственных связей в системе «биосфера – атмосфера – гидросфера» позволит найти эффективные решения для стоящих перед человечеством глобальных экологических и климатических проблем.



Развитие природно-климатических проектов в рамках программы карбоновых полигонов должно ориентироваться на положительный опыт наиболее успешных проектов, в частности на аграрных площадках.

Успешные природно-климатические проекты запущены на полигоне «Агро-Инженерия» в Самарской области, в «Чашниково» в Московской области, на лесных, болотных и степных полигонах «Мухрино» в ХМАО, «WAY CARBON» в Чеченской республике, в «Евразийском» в Республике Башкортостан, «Карбон-Поволжье» в Республике Татарстан, «Геленджик» в Краснодарском крае, «Росянка» в Калининградской области и FOR&ST CARBON в Воронежской области. Целесообразно обеспечить систематизацию результатов реализации таких проектов, включая описание применяемых технологий, природно-климатических условий, методик мониторинга, достигнутого климатического эффекта, сопутствующих экологических эффектов и факторов, определяющих возможность масштабирования результатов.

Полезным является дальнейшее развитие Платформы поддержки ПКП, разработанной центром цифровых технологий для ПКП НИУ ВШЭ. Цифровые инструменты обеспечат поддержку полного жизненного цикла природно-климатического проекта, от предвари-

тельной оценки территории и разработки проектной документации до мониторинга, верификации и анализа достигнутого эффекта.

В совокупности развитие научной, методической, цифровой и организационной инфраструктуры природно-климатических проектов должно обеспечить не только возможность монетизации климатического потенциала экосистем России, но и формирование научно обоснованной системы разработки и верификации решений, направленных на снижение антропогенного воздействия на климатическую систему, сохранение природных экосистем и устойчивое управление природными ресурсами.

2.2.4 Интеграция карбоновых полигонов в систему учета углеродного следа сельскохозяйственной продукции

В 2025–2026 гг. Минсельхоз России приступил к разработке методики расчета выбросов парниковых газов в растениеводстве и животноводстве, а Минэкономразвития России формирует более широкую национальную систему учета углеродного следа продукции – стандарты расчета по видам продукции, базу данных коэффициентов выбросов и цифровые инструменты (калькулятор углеродного следа, реестр отчетности). Нормативную базу этой системы предполагается сформировать в 2026 году с последующим добровольным пилотированием в 2027 году.

Кроме этого, Минэкономразвития России на основе мирового опыта предложило ввести обязательную отчетность для предприятий АПК с выбросами >50 тыс. тонн CO₂ в год. Для введения такой нормы требуется разработка методик расчета выбросов парниковых газов в растениеводстве и животноводстве. С учетом позиции Минсельхоза России и отраслевых союзов пока достигнута договоренность о введении такого регулирования только для сжигания топлива. Но переход к углеродному регулированию в АПК, обусловленный мировыми тенденциями, может произойти в ближайшей перспективе. Данная инициатива напрямую затрагивает агроландшафтные карбоновые полигоны и функционально расширяет их задачи: от исследовательского мониторинга потоков газов к участию в верификации отраслевых методик расчета углеродного следа конкретной продукции.

Чтобы сеть карбоновых полигонов не осталась в стороне от формирующейся государственной

системы учета углеродного следа, а стала ее научно-методической опорой, предлагается предусмотреть следующие направления работы.

1. Участие агроландшафтных полигонов, в том числе площадок с профилем растениеводства и животноводства, в пилотной апробации методик Минсельхоза России по расчету выбросов для отдельных категорий продукции, с предоставлением верифицированных первичных данных по потокам CO₂, CH₄ и N₂O, полученных пульсационными и камерными измерениями, в качестве независимой эталонной базы для калибровки отраслевых коэффициентов выбросов.
2. Закрепление за Единой цифровой платформой (раздел 3) функции сопряжения данных карбоновых полигонов с формируемым Минэкономразвития России реестром отчетности об углеродном следе продукции и национальной базой коэффициентов выбросов, в том числе через разработку соответствующего программного интерфейса (API) и регламента передачи агрегированных данных.
3. Развитие на базе агроландшафтных полигонов расчетных продуктов (см. 3.4.3 и 3.4.7), позволяющих переходить от локальных измерений баланса парниковых газов к оценке удельного углеродного следа конкретных видов сельскохозяйственной продукции (зерновые, масличные, продукция



животноводства) с учетом региональной и технологической специфики; такие продукты должны формироваться в сопоставимой с международными подходами методологии (в частности, ISO 14067) для минимизации издержек экспортеров при трансграничном углеродном регулировании.

4. Методическое участие операторов полигонов в разработке и последующей актуализации отраслевой методики Минсельхоза России, включая формирование предложений по учету реальной секвестрационной способности почв и агроландшафтов (в противовес усредненным литературным коэффициентам), а также по учету технологий почвозащитного и ресурсосберегающего земледелия, снижающих эмиссию N₂O и CH₄.
5. Включение в компетенции создаваемых Центров Разработки (раздел 3.3) задачи по разработке отраслевых калькуляторов углеродного следа сельскохозяйственной продукции, учитывающих верифицированные данные полигонов.



Реализация направления по разработке отраслевых калькуляторов углеродного следа сельскохозяйственной продукции, учитывающих верифицированные данные полигонов позволит карбоновым полигонам занять центральное место в формирующейся государственной системе учета углеродного следа продукции.

Решение этой задачи позволит также обеспечить научную обоснованность применяемых коэффициентов выбросов и повысить конкурентоспособность российского аграрного экспорта в условиях трансграничного углеродного регулирования (см. также 2.2.3).

6. Формирование на базе аграрных карбоновых полигонов системы комплексной оценки агротехнологий. Такая система должна выходить за рамки оценки исключительно углеродного баланса и учитывать взаимосвязь между применяемыми технологиями земледелия, состоянием почв, водным режимом и качеством водных объектов,

потоками климатически активных газов, биоразнообразием и продуктивностью агроэкосистем. Перспективным является применение интегрированного подхода, позволяющего проследить последствия использования различных агротехнологий от уровня отдельного поля до масштаба водосбора. Это позволит оценивать совокупный климатический и экологический эффект применяемых технологий, включая их влияние на сохранение плодородия почв,

снижение эрозионных и деграционных процессов, формирование латерального стока и устойчивость сельскохозяйственного производства. Полученные результаты могут использоваться для разработки и научной верификации почвозащитных, ресурсосберегающих и климатически ориентированных агротехнологий, а также для подготовки рекомендаций по их применению в различных природно-климатических условиях России.

03

СОЗДАНИЕ ЕДИНОЙ ЦИФРОВОЙ ПЛАТФОРМЫ ПРОЕКТА



3.1 НАЗНАЧЕНИЕ И ОБЩАЯ КОНЦЕПЦИЯ ЕДИНОЙ ЦИФРОВОЙ ПЛАТФОРМЫ

Единая цифровая платформа проекта карбоновых полигонов рассматривается как ключевой обеспечивающий механизм для накопления, систематизации, обмена и последующего использования данных и иных результатов, формируемых в рамках программы. Ее задача состоит в том, чтобы связать разнородные результаты деятельности отдельных полигонов в общую информационную основу, сохраняя происхождение данных, научный и методический контекст их получения и возможность последующего сопоставления и повторного использования. Платформа при этом не подменяет локальные информационные системы и научные процессы отдельных полигонов, а обеспечивает инфраструктуру взаимодействия между ними и внешними пользователями результатов программы.

Правовая определенность обмена данными является одним из исходных условий функционирования платформы. Передача данных в Экспертный центр, их хранение, предоставление доступа другим участникам, цитирование, защита научного приоритета и использование при создании производных результатов должны осуществляться в заранее определенной правовой рамке. Такая рамка должна одновременно защищать интересы карбоновых полигонов как первоисточников данных и создавать понятные механизмы их научного, аналитического и прикладного

использования. Конкретные режимы доступа и использования данных раскрываются далее, как отдельная составляющая архитектуры платформы.

Платформа строится как двухуровневая система. Первый уровень формирует инфраструктура данных Экспертного центра по научно-методическому сопровождению создания и функционирования карбоновых полигонов на базе Института океанологии им. П. П. Ширшова РАН. Ее технологическим ядром является система CDCS (Climate Data Collection System). На этом уровне обеспечиваются прием и долговременное хранение исходных пакетов данных, их атрибуция, сопровождение метаданными, последующая классификация и формирование единой системы типов данных. Для тех классов наблюдений, для которых это методически возможно, предусматривается поэтапная гармонизация представления данных и подготовка сопоставимых межполигонных массивов. При этом исходные материалы сохраняются без принудительного преобразования, что позволяет не терять информацию и контекст, существенные для научной интерпретации.

Второй уровень образует сеть Центров разработки продуктовых и аналитических решений (далее — Центры Разработки). Это научные и образовательные организации, участвующие в реализации программы, иные организации, которые используют доступные им в установленном правовом

режиме данные и иные результаты программы для решения научных, аналитических, организационных, общественно значимых и прикладных задач. Центры Разработки не образуют единой административной вертикали: каждый из них действует в соответствии со своей специализацией, компетенциями и поставленными перед ним задачами. В настоящее время в качестве таких центров выступают ЦЦТ ПКП НИУ ВШЭ и Экспертный центр на базе ИО РАН. В перспективе могут быть задействованы и другие организации, располагающие соответствующей экспертизой.

Связь между двумя уровнями должна обеспечивать последовательный переход от исходных наблюдений и результатов исследований к систематизированным информационным ресурсам, а затем — к производным аналитическим, научным, технологическим и прикладным решениям. За счет этого Единая цифровая платформа становится не только средством хранения данных, но и основой для их осмысленного повторного использования, межполигонного анализа, развития методик, построения моделей и информационных систем, поддержки принятия решений и формирования иных результатов, востребованных участниками программы, государственными органами, научным сообществом и внешними партнерами.

3.2 ПЕРВЫЙ УРОВЕНЬ ПЛАТФОРМЫ: ИНФРАСТРУКТУРА ДАННЫХ ЭЦ И СИСТЕМА CDCS

Первый уровень Единой цифровой платформы формирует инфраструктура данных Экспертного центра (ЕЦ), технологическим ядром которой является система CDCS (Climate Data Collection System). Она предназначена для приема, длительного накопления и первичной организации данных и сопровождающих материалов карбоновых полигонов с сохранением контекста их получения. CDCS развивается на инфраструктуре Института океанологии им. П. П. Ширшова РАН и объединяет пользовательские средства загрузки, регистрацию метаданных, файловые хранилища и компоненты интеллектуального анализа документов и описаний данных. На этой основе далее должны развиваться классификация, гармонизация, поиск и механизмы предоставления данных.

3.2.1 Прием и накопление разнородных данных

Принципиальная особенность CDCS — отсутствие требования предварительно приводить все поступающие данные к единому формату. Полигоны формируют существенно различающиеся результаты: метеорологические и газоаналитические временные ряды, данные камерных наблюдений, полевых и лабораторных экспериментов, дистанционного зондирования, таксации, гидрологических и биогеохимических исследований, модельные и иные материалы. Жесткая унификация на входе увеличивала бы трудоемкость передачи данных и могла бы приводить к потере важного научного контекста.

На этапе приема приоритет отдается безбарьерному накоплению максимально широкого спектра результатов. Пользователь передает в CDCS логически самостоятельный пакет в том виде, в котором он подготовлен для дальнейшей научной работы, дополняя его кратким описанием и, при необходимости, отчетами, публикациями, инструкциями к оборудованию, методическими материалами и другими сопровождающими документами. Исходные файлы сохраняются без принудительной трансформации; долговременное хранение организуется на файловой инфраструктуре Экспертного центра, а пакет остается связанным с метаданными и историей его сопровождения в системе.

3.2.2 Интеллектуальное сопровождение и формирование метаданных

CDCS использует диалоговый способ сопровождения загрузки данных. Пользователь описывает пакет в свободной форме и при необходимости отвечает на уточняющие вопросы системы. Таким образом могут фиксироваться состав измеряемых величин, период и дискретность наблюдений, место проведения работ, применяемые приборы и методики, степень предварительной обработки и иные сведения, необходимые для интерпретации данных. Описание может дополняться и после первоначальной загрузки.

Сопроводительные документы рассматриваются как полноценный источник метаинформации. Для их анализа на стороне Экспертного центра применяются современные языковые и мультимодальные модели искусственного интеллекта, позволяющие извлекать значимые

элементы метаданных и устанавливать смысловые связи между файлами, описаниями и документацией. Такая обработка не подменяет научную экспертизу: проверка физической достоверности значений, интерпретация результатов и выявление предметно-специфических артефактов остаются самостоятельными исследовательскими задачами.

3.2.3 Классификация, единая система типов и гармонизация данных

Гибкость приема является начальным этапом работы с данными, а не их конечным состоянием. На стороне Экспертного центра должна проводиться последовательная классификация поступающих пакетов с их включением в единую развивающуюся систему типов данных карбоновых полигонов. Классификация опирается на описание пользователя, сопровождающие документы и анализ содержания файлов в той мере, в которой он технически и методически возможен. По мере накопления информации таксономия уточняется и детализируется.

В развитии CDCS уже предусмотрен автоматизированный анализ заявочной и отчетной документации и сопоставление ожидаемых результатов наблюдений с фактически представленными пакетами. Система может использоваться для выделения направлений исследований и методик, анализа заявленных периодов наблюдений и формирования представления о полноте данных по отдельным полигонам и программе в целом.

Для достаточно стандартизируемых типов данных классификация должна дополняться гармонизацией представления. Прежде всего это относится к метеорологическим данным, результатам измерений потоков методом вихревых ковариаций, камерным наблюдениям и другим классам, для которых существуют устойчивые методические требования. Для них могут формироваться согласованные структуры данных и метаданных, единицы измерения, правила именования величин и признаки качества, необходимые для получения сопоставимых межполигонных массивов. Гармонизированное представление создается

дополнительно и не заменяет исходный пакет; уникальные или слабо стандартизируемые результаты могут сохраняться в исходной форме при надежной классификации и подробном описании.

3.2.4 Представление, поиск и программный доступ к данным

Пользовательский интерфейс CDCS постепенно развивается от средства загрузки данных к средству навигации по накопленному информационному массиву. В текущей реализации пользователь полигона видит собственные зарегистрированные пакеты, их статус, описание и связанный с ними диалог. Представление расширяется таким образом, чтобы пользователь мог видеть структуру и состояние переданных им материалов, а также сведения о пакетах других полигонов, доступных ему в соответствии с установленным правовым режимом.

Отдельным направлением развития являются смысловая индексация, поиск и программный доступ. Предполагается поиск по полигону, типу данных, периоду наблюдений, методике, территории и другим содержательным признакам. Для Центров Разработки основным механизмом интеграции должны стать API, обеспечивающие машинно-читаемый доступ к метаданным и, в предусмотренных правовым режимом случаях, к самим данным или их гармонизированным представлениям. Программный доступ подчиняется тем же правилам лицензирования, атрибуции и разграничения прав, что и работа через пользовательский интерфейс.



3.3 ВТОРОЙ УРОВЕНЬ ПЛАТФОРМЫ: СЕТЬ ЦЕНТРОВ РАЗРАБОТКИ ПРОДУКТОВЫХ И АНАЛИТИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ

Второй уровень Единой цифровой платформы образует сеть Центров разработки продуктовых и аналитических решений (далее — Центры Разработки). Центром Разработки может выступать научная, образовательная, аналитическая или технологическая организация либо ее профильное подразделение, использующее доступные данные карбоновых полигонов и другие результаты программы для разработки производных аналитических, научных, информационных, технологических и прикладных решений. Сеть является открытой по составу и может расширяться по мере появления новых задач и компетенций.

3.3.1 Организационный принцип сети Центров Разработки

Центры Разработки являются независимыми участниками платформы и не образуют единой административной вертикали. Каждый центр определяет направления работы в соответствии со своей научной и технологической специализацией, задачами реализуемых проектов, поручениями и запросами органов управления, научного сообщества, операторов карбоновых полигонов, промышленных партнеров и иных заинтересованных пользователей. Такой принцип позволяет сочетать разнообразие компетенций и подходов с использованием общей инфраструктуры данных.

Едиными для Центров Разработки являются правила взаимодействия с инфраструктурой данных Экспертного центра. Центры могут работать с различными типами



данных, объединять материалы нескольких полигонов, применять собственные методы анализа и вычислительные средства. Доступ к исходным данным осуществляется в пределах установленных правовых режимов; при этом должны сохраняться происхождение использованных наборов, их связь с конкретными полигонами и условия дальнейшего использования.

3.3.2 Взаимодействие Центров Разработки с ЭЦ/CDCS

Инфраструктура ЭЦ/CDCS должна выступать для Центров Разработки единым источником систематизированной информации о доступных данных и механизмом их получения. Развитие классификации, гармонизации, смысловой индексации и поиска позволит формировать запрос к уже описанному информационному ресурсу вместо ручной работы с разрозненными файлами. Для регулярного и автоматизированного обмена предусматривается развитие API, через которые Центры Разработки смогут получать разрешенные данные и метаданные и связывать собственные информационно-аналитические системы с CDCS.

Архитектура платформы допускает одновременное существование нескольких независимых решений поверх одних и тех же или пересекающихся массивов данных. Различные центры могут решать задачи анализа состояния программы, совместной обработки наблюдений, моделирования, пространственного анализа или разработки прикладных решений. Такое разнообразие не рассматривается как дублирование: различие задач, экспертизы и целевых пользователей позволяет получать из общего массива данных разные типы полезных результатов.

3.4 ПРОИЗВОДНЫЕ АНАЛИТИЧЕСКИЕ И ПРОДУКТОВЫЕ РЕШЕНИЯ

Накопление, классификация и гармонизация данных карбоновых полигонов не являются основной целью функционирования Единой цифровой платформы. Их основная ценность раскрывается при последующем использовании данных и результатов исследований для получения производной информации, проведения межполигонного анализа, построения моделей, разработки методик и технологий, а также создания решений, востребованных органами управления, научным сообществом, операторами полигонов, промышленными партнерами и другими заинтересованными пользователями. Именно для выполнения таких задач формируется сеть независимых Центров Разработки.

Понятие «продуктовое решение» в рамках платформы используется в широком смысле и не сводится к коммерческому продукту. Результатом работы Центра Разработки может быть аналитический отчет или информационная система, интегрированный набор данных, математическая или нейросетевая модель, цифровая карта, методика, система поддержки принятия решений, технологическое решение либо прикладной продукт для внешнего пользователя. Конкретный состав таких результатов определяется характером решаемой научной, аналитической, организационной, общественно значимой или прикладной задачи.

3.4.1 Аналитические продукты

Аналитические продукты предназначены для получения целостного представления о состоянии отдельных карбоновых полигонов и программы в целом. Они будут включать анализ полноты представленных данных и наблюдений, сопоставление заявленных и фактически полученных результатов, оценку динамики накопления данных, характеристик исследовательской инфраструктуры и других показателей, необходимых для содержательного анализа хода программы, что является задачей Экспертного Центра. Еще одним направлением является разрабатываемый Центром цифровых технологий для природно-климатических проектов НИУ ВШЭ прототип информационно-аналитической системы, в котором будут интегрироваться сведения об активах полигонов, а также о результатах и потенциальных продуктах. Два этих направления будут развиваться ЭЦ и ЦЦТ ПКП во взаимосвязи и взаимообусловленности.

3.4.2 Научные информационные продукты

Научные информационные продукты формируются при объединении и совместном анализе результатов нескольких полигонов. К ним могут относиться интегрированные межполигонные наборы данных, сопоставимые временные ряды наблюдений, сводные характеристики отдельных типов экосистем, результаты сравнительного анализа и новые производные показатели, получение которых невозможно или малоинформативно на материале одной площадки. Развитие на стороне Экспертного центра единой системы типов данных и гармонизация стандартизируемых классов наблюдений должны постепенно расширять возможности такого анализа. В результате данные полигонов становятся основой не только для локальных исследований, но и для исследований пространственной и временной изменчивости процессов углеродного цикла на уровне сети карбоновых полигонов.

3.4.3 Расчетные и модельные продукты

Расчетные и модельные продукты могут включать модели углеродного баланса, оценки и пространственное масштабирование потоков парниковых газов, региональные оценки запасов углерода, прогнозные модели состояния природных систем и другие вычислительные решения. Для их разработки могут совместно использоваться данные наземных наблюдений, дистанционного зондирования, результаты лабораторных исследований и внешние пространственно распределенные данные. В качестве одного из возможных Центров Разработки в данном направлении могут выступать и операторы полигонов, в частности ИО РАН, УрФУ и другие организации. Например, Центр наук о Земле МФТИ, включая Лабораторию машинного обучения в науках о Земле. Его компетенции

“

Второй уровень платформы образует сеть Центров разработки продуктовых и аналитических решений, которым может выступать научная, образовательная, аналитическая или технологическая организация, использующее данные карбоновых полигонов для разработки производных решений.

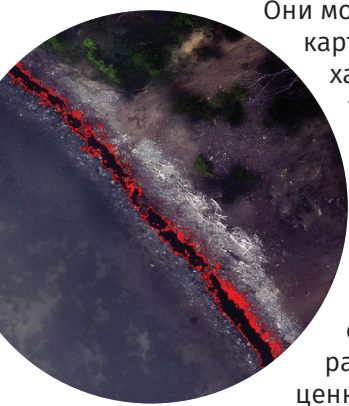
“

Основная ценность Единой цифровой платформы раскрывается при использовании данных для получения производной информации, а также для создания решений, востребованных органами управления, научным сообществом, операторами полигонов, промышленными партнерами.

могут быть использованы, например, для разработки методов интеллектуального анализа разнородных данных, нейросетевых моделей, пространственного обобщения наблюдений и построения производных оценок на основе совместного использования данных нескольких источников. Такое упоминание является примером возможного распределения компетенций и не ограничивает участие других организаций.

3.4.4 Геоинформационные продукты

Геоинформационные продукты обеспечивают пространственное объединение и представление результатов наземных, дистанционных и модельных исследований.



Они могут включать цифровые карты полигонов и отдельных характеристик экосистем, тематические картографические слои, цифровые модели рельефа и растительного покрова, схемы районирования, карты потоков и запасов углерода, а также интерфейсы пространственного сопоставления данных различных типов. Особую ценность представляет возможность связывать точечные и локальные наблюдения с пространственно распределенной информацией. Это создает основу для оценки репрезентативности наблюдений, масштабирования результатов, планирования дополнительных измерений и формирования пространственно ориентированных аналитических и прикладных решений.

3.4.5 Системы поддержки принятия решений

Системы поддержки принятия решений могут использовать интегрированные данные и производную аналитику для задач федеральных органов исполнительной власти (например, Росгидромета, Минэкономразвития России, Минприроды России, Рослесхоза и других), региональных органов управления и других пользователей. Их назначение состоит в представлении в компактной и интерпретируемой форме информации о состоянии программы, доступности и полноте данных, развитии отдельных направлений исследований и возможных вариантах дальнейших действий. Такие системы не подменяют экспертное решение. Они

формируют информационную основу для него: позволяют выявлять пробелы в наблюдениях, сопоставлять результаты полигонов, отслеживать выполнение заявленных мероприятий, определять направления, требующие дополнительного методического или организационного внимания, и оценивать последствия различных вариантов развития программы.

Системы поддержки принятия решений должны обеспечивать возможность органами исполнительной власти быстрее и точнее принимать решения по климату, землепользованию и природным проектам. Это касается мониторинга текущего состояния почв, лесов, выбросов и поглощения углерода, оценки рисков на региональном уровне, в том числе в части деградации земель, пожаров, засух, а также выявления эффективно работающий практик, оценки последствий различных управленческих решений в области лесовосстановления, изменение сельхозпрактик, охраны земель. Это будет способствовать улучшению отчетности для министерств, регионов и надзорных органов. Другими словами, системы поддержки принятия решений будут обеспечивать превращение экологических данных по полигонам в понятные управленческие решения для региональных и отраслевых властей. При этом такие системы отнюдь не должны подменять экспертное решение, а формировать информационную основу для него.

3.4.6 Методические и технологические решения

Методические и технологические решения могут включать разработку и уточнение методик наблюдений и обработки данных, процедур контроля качества, способов совместного использования разных типов измерений, а также разработку и оценку технологий снижения эмиссии и повышения секвестрации углерода. По мере накопления результатов на полигонах такие решения могут проходить последовательную проверку, сопоставление между площадками и дальнейшую методическую формализацию. К этой же группе относятся инструменты, позволяющие оценивать степень готовности и применимости разрабатываемых технологий. Связь технологического решения с данными, на которых оно было разработано и проверено, позволяет сохранять доказательную основу результата и обеспечивает возможность его последующего воспроизведения и развития.

3.4.7 Прикладные и отраслевые продуктовые решения

Прикладные и отраслевые продуктовые решения, ориентированные на использование результатов программы за пределами собственно исследовательского процесса, например, цифровая платформа для поддержки природно-климатических и лесоклиматических проектов ЦЦТ ПКП НИУ ВШЭ. Они могут создаваться для задач сельского и лесного хозяйства, экологического мониторинга, управления территориями, оценки климатических рисков и других направлений, в которых данные и компетенции карбоновых полигонов способны обеспечить практический эффект. При наличии соответствующего запроса и правовых оснований отдельные решения могут получать и коммерческое применение. При этом коммерциализация рассматривается как один из возможных сценариев использования, а не как обязательная цель работы с данными. Объединение результатов нескольких полигонов и компетенций разных Центров Разработки позволяет создавать решения более широкого масштаба, сохраняя при этом прослеживаемость происхождения использованных данных и соблюдение установленных условий доступа к ним. Перечисленные классы решений не являются взаимоисключающими и не образуют закрытого перечня. Один продукт может одновременно сочетать научный, аналитический, геоинформационный и прикладной компоненты. Архитектура Единой цифровой платформы должна обеспечивать возможность появления таких решений без закрепления единого набора продуктов за всей сетью: каждый Центр Разработки выбирает направления работы в соответствии со своей компетенцией и поставленными перед ним задачами, а общая инфраструктура ЭЦ/CDCS обеспечивает доступ к необходимой информационной основе в рамках установленных технических и правовых правил.

“

Правовая определенность обмена данными снижает опасения полигонов относительно неконтролируемого использования результатов их работы и создает реальные условия для межполигонного анализа, научного обмена и разработки производных решений.

3.5 ПРАВОВАЯ МОДЕЛЬ ОБМЕНА И ПОВТОРНОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ДАННЫХ

Правовая определенность обмена данными является обязательным условием функционирования Единой цифровой платформы. Для операторов карбоновых полигонов принципиально важно понимать, кто и на каких основаниях получает доступ к переданным данным, как сохраняются авторство и научный приоритет, в каких случаях данные могут использоваться другими участниками проекта и какие правила действуют при создании производных результатов. Поэтому правовая модель должна формироваться одновременно с развитием технической инфраструктуры платформы, а не после того, как обмен данными уже начался.

Передача пакета данных в ЭЦ/CDCS сама по себе не означает его автоматическое открытое опубликование или предоставление неограниченного доступа третьим лицам. CDCS обеспечивает прием, хранение, атрибуцию и последующую систематизацию данных; режим их дальнейшего предоставления определяется заранее установленными правилами, закрепленными в трехсторонних соглашениях между оператором полигона, Экспертным Центром и третьей стороной, заявляющей о потребности в соответствующих данных. Такой третьей стороной может быть один из Центров Разработки. Такой подход позволяет, с одной стороны, снизить опасения полигонов относительно неконтролируемого использования результатов их работы, а с другой — создать реальные условия для межполигонного анализа, научного обмена и разработки производных аналитических и продуктовых решений.

3.5.1 Участники правовой модели и базовые принципы

Базовая правовая связка платформы включает три стороны: карбоновый полигон, Экспертный центр/CDCS и Центр Разработки. Карбоновый полигон выступает первоисточником данных и сопровождающей научной информации. Экспертный центр обеспечивает инфраструктуру приема, хранения, классификации и предоставления данных в пределах установленных полномочий. Центр Разработки получает доступ к разрешенной части информационного ресурса для решения научных, аналитических, организационных, общественно значимых и прикладных задач и создания производных результатов.

Для каждого пакета данных должна сохраняться прослеживаемость его происхождения. В составе метаданных фиксируются полигон-источник, автор или коллектив, период и условия получения данных, методика и степень предварительной обработки, а также применимый режим доступа. Эти сведения должны сопровождать данные при их последующей передаче и использовании и, где это возможно, автоматически переноситься в производные информационные продукты. Таким образом, дальнейшее использование данных не разрывает связь результата с коллективом, который их получил.

Правовая модель должна быть типовой и масштабируемой. Работа платформы не должна зависеть от ручного согласования каждой отдельной передачи файла между конкретным полигоном и конкретным пользователем. Базовые условия научного и аналитического использования целесообразно закреплять в типовых соглашениях и правилах доступа, к которым могут присоединяться участники платформы. Дополнительное согласование требуется в тех случаях, когда характер использования выходит за пределы предусмотренного базового режима, прежде всего при коммерческом применении.

3.5.2 Режимы доступа и использования данных

Платформа должна поддерживать дифференцированные режимы доступа, соответствующие характеру данных и целям их использования. Конкретный режим задается для пакета данных или его производного представления и должен быть явно виден пользователю до получения доступа. Это позволяет сочетать открытость части результатов программы с защитой данных, для которых необходимы ограничения по научным, правовым или организационным основаниям.

Публичный уровень может включать базовые климатические и иные данные, для которых предусмотрено свободное научное и общественное использование, а также агрегированные и осредненные наборы, не раскрывающие ограниченные исходные материалы. Их использование сопровождается обязательным указанием происхождения данных и соблюдением установленных правил цитирования. Регламентированный уровень предназначен для исходных или специализированных

данных, доступ к которым предоставляется исследовательским организациям, Центрам Разработки и другим участникам в соответствии с установленными условиями. В рамках этого режима могут применяться ограничения на круг пользователей, цели использования, передачу третьим лицам и срок открытого распространения. Коммерческое использование данных или создаваемых на их основе решений рассматривается как специальный случай и при необходимости оформляется отдельными условиями или соглашением с участием правообладателей.

Государственный уровень охватывает данные и результаты, используемые в официальной отчетности, государственных информационных ресурсах и иных регламентированных процедурах. Для такого уровня должны быть определены требования к составу, происхождению и статусу информации, а также порядок ее передачи и использования соответствующими органами и организациями.

3.5.3 Цитирование, научный приоритет и временные ограничения доступа

Защита научного приоритета должна сочетаться с возможностью последующего повторного использования данных. Одним из базовых механизмов является обязательная атрибуция: пользователь, получающий набор данных, принимает условия корректного указания полигона и коллектива, сформировавшего данные. Для отдельных наборов могут задаваться рекомендуемая форма цитирования, ссылка на публикацию или описание набора данных и иные сведения, необходимые для однозначной идентификации источника. Для результатов, по которым коллективу необходимо сохранить возможность первой научной публикации, может применяться временное эмбарго. В течение установленного периода доступ к исходным данным ограничивается или предоставляется только в согласованном режиме; после завершения периода условия доступа могут изменяться автоматически в соответствии с заранее заданными правилами. Продолжительность и конкретные условия эмбарго должны определяться типом данных и принятой правовой моделью, а не устанавливаться единообразно для всех материалов. Информация о режиме использования должна быть связана непосредственно с записью о пакете данных в CDCS. По мере развития пользовательского интерфейса рядом с описанием пакета

должны отображаться применимые условия доступа, правила цитирования и, при наличии, срок действия ограничений. Это позволяет превратить правовую модель из внешнего набора документов в функциональную часть информационной системы.

3.5.4 Создание производных решений и взаимодействие с Центрами Разработки

Правовая модель должна позволять использовать данные нескольких полигонов для создания производных аналитических и продуктовых решений без утраты связи с первоисточниками. Центры Разработки могут получать данные и метаданные через предусмотренные пользовательские или программные интерфейсы только в объеме, соответствующем предоставленным им правам. При автоматизированном обмене через API те же ограничения применяются машинно: техническая возможность доступа не шире юридически разрешенного режима использования.

Производный результат должен рассматриваться отдельно от использованных при его создании исходных данных. Модель, аналитический отчет, карта, программная система или иной продукт может содержать существенно переработанную и агрегированную информацию и иметь самостоятельное авторство и условия использования. При этом должны сохраняться сведения о происхождении использованных наборов и выполняться требования их лицензирования и цитирования. Конкретное распределение прав на производный результат

определяется характером разработки, вкладом участников и соответствующими соглашениями.

Для научного и аналитического использования целесообразно формировать максимально единообразные правила, не требующие повторного согласования каждой операции. Для коммерческого применения, передачи исключительных прав или иных сценариев, способных создавать самостоятельный экономический эффект, могут устанавливаться дополнительные условия с участием полигона-источника, Экспертного центра и Центра Разработки. Такая конструкция позволяет не блокировать научный обмен и разработку общественно значимых решений, одновременно сохраняя возможность отдельно регулировать коммерчески чувствительные сценарии.

“ В результате правовая модель Единой цифровой платформы должна обеспечивать баланс между защитой интересов карбоновых полигонов и реальной возможностью использования накопленных данных в масштабе всей программы. Ее задача состоит не только в ограничении доступа, но и в формировании понятных, заранее известных правил, при которых полигоны сохраняют связь с созданными ими данными и научный приоритет, Экспертный центр может систематизировать и предоставлять информационный ресурс, а Центры Разработки — создавать на его основе новые научные, аналитические и прикладные результаты.

3.6 ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ЭЛЕМЕНТОВ ПЛАТФОРМЫ И ЖИЗНЕННЫЙ ЦИКЛ ДАННЫХ

Единая цифровая платформа должна обеспечивать не изолированное хранение отдельных массивов информации, а последовательный жизненный цикл данных от их получения на карбоновом полигоне до формирования производных научных, аналитических и прикладных результатов. В этой цепочке полигоны, Экспертный центр / CDCS и Центры Разработки выполняют разные функции, но работают с взаимосвязанными представлениями одних и тех же результатов. На всех стадиях должны сохраняться происхождение данных, их содержательный и методический контекст, а также установленный режим доступа и использования.

Базовый принцип взаимодействия состоит в том, что исходный пакет данных не теряется и не подменяется последующими преобразованиями. Классифицированные, гармонизированные или иным образом подготовленные представления формируются как связанные с ним информационные объекты. Это позволяет одновременно сохранить исходный научный материал и создавать более удобные формы данных для межполигонного анализа, автоматизированной обработки и работы Центров Разработки.

3.6.1 От результата карбонового полигона к систематизированному ресурсу данных

Жизненный цикл начинается на стороне карбонового полигона с формирования результата наблюдений, измерений, эксперимента, расчета или иной исследовательской деятельности. В CDCS такой результат передается в виде пакета данных вместе с доступным описанием и, при необходимости, сопроводительными материалами: отчетами, методическими документами, описаниями приборов и процедур обработки, публикациями и другими источниками контекста. На этапе приема не требуется предварительная унификация данных в единую форму; принципиально важнее обеспечить их передачу в интерпретируемом виде и сохранить сведения, необходимые для последующего понимания содержания.

После загрузки CDCS регистрирует пакет и связывает его с полигоном-источником, описанием, сопровождающими документами и

диалогом пользователя с системой. Исходные файлы сохраняются без принудительного преобразования и переводятся в долговременное хранение. Интеллектуальные средства системы используются для анализа описаний и документов, извлечения и уточнения метаданных и формирования более содержательного представления о составе пакета. При необходимости информация о пакете может дополняться на последующих этапах.

Следующим этапом является последовательная систематизация накопленного массива данных на стороне Экспертного центра. По мере развития платформы пакеты классифицируются в рамках единой системы типов данных, а для тех классов наблюдений, где существуют устойчивые методические основания, выполняется дополнительная гармонизация структуры, единиц измерения, состава метаданных и других характеристик. При этом структурная проверка и гармонизация не должны подменять научную оценку достоверности конкретных измеренных значений, ответственность за которую остается частью предметной научной работы.

3.6.2 Обнаружение данных и предоставление доступа

Систематизация данных должна постепенно превращать накопленное файловое хранилище в доступный для содержательного поиска информационный ресурс. Развитие пользовательского интерфейса CDCS предусматривает расширение возможностей просмотра, смысловой индексации, фильтрации и поиска, чтобы представители полигонов могли получать более полное представление как о переданных ими материалах, так и о пакетах других полигонов, доступных им в соответствии с установленным правовым режимом. Видимость записи о пакете и возможность получения самих данных при этом могут регулироваться отдельно.

Для Центров Разработки программное взаимодействие с инфраструктурой данных предполагается организовывать через API и иные контролируемые механизмы доступа. Такой интерфейс предназначен для автоматизированного поиска, получения метаданных и, при наличии соответствующих прав, передачи необходимых массивов в аналитические, модельные и прикладные системы. Наличие API не означает открытого или неограниченного доступа: состав доступных данных и допустимые способы их использования определяются правовой моделью платформы.

3.6.3 Создание производных результатов и сохранение прослеживаемости

Получив доступ к необходимым данным, Центр Разработки использует их в рамках конкретной научной, аналитической, организационной, общественно значимой или прикладной задачи. В зависимости от постановки такая работа может объединять материалы нескольких полигонов с внешними источниками данных, моделями и экспертной информацией и приводить к созданию интегрированного набора данных, аналитического отчета, карты, модели, программной системы, методики, технологического решения или иного производного продукта.

Связь производного результата с использованными исходными данными должна сохраняться на всем протяжении их дальнейшего использования. Для этого в производном продукте или его описании фиксируются источники данных, условия доступа и требования к атрибуции, а там, где это технически возможно, сохраняется машинно-читаемая связь с соответствующими пакетами CDCS. Такой механизм обеспечивает научную прослеживаемость результата и позволяет учитывать вклад полигонов, предоставивших исходные материалы.

Жизненный цикл данных не обязательно завершается созданием первого производного продукта. Полученные в Центрах Разработки интегрированные наборы данных, методы обработки и иные результаты, представляющие значение для программы карбоновых полигонов, в дальнейшем могут становиться основой новых исследований и разработок. В пределах установленных правовых условий целесообразно предусмотреть возможность их регистрации и описания в общей информационной среде, чтобы платформа постепенно накапливала не только исходные данные, но и сведения о результатах их содержательного использования.



3.7 ОРГАНИЗАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ И НАПРАВЛЕНИЯ РАЗВИТИЯ ПЛАТФОРМЫ

Организационная модель Единой цифровой платформы строится на разделении функций между карбоновыми полигонами, Экспертным центром / CDCS и сетью Центров Разработки. Такое разделение не предполагает создания единой административной вертикали для всех участников. Целостность платформы обеспечивается общей инфраструктурой данных, согласованными техническими механизмами взаимодействия и единой правовой рамкой доступа и использования данных.

3.7.1 Роли основных участников платформы

Карбоновые полигоны являются первичными источниками данных и научных результатов. На их стороне формируются результаты наблюдений, измерений, экспериментов, расчетов и исследований, а также сопровождающие материалы, необходимые для их корректной интерпретации. Полигоны передают данные в ЭЦ/CDCS с описанием их происхождения и контекста, участвуют в уточнении метаданных и сохраняют связь с переданными наборами как их первоисточники. Передача данных в инфраструктуру платформы не изменяет сама по себе установленные права на них и не означает автоматического предоставления данных третьим сторонам.

Экспертный центр / CDCS выполняет методические и инфраструктурные функции общей системы данных. На его стороне обеспечиваются прием и долговременное хранение исходных пакетов, их атрибуция, накопление метаданных, последовательная классификация и развитие единой системы типов данных. Для тех классов наблюдений, где это методически обосновано, Экспертный

центр организует гармонизацию представления данных и формирование сопоставимых массивов. По мере развития CDCS к этим функциям добавляются более развитые средства индексации и поиска, представления доступных пользователю наборов и программного доступа для Центров Разработки.

Функции ЭЦ/CDCS не следует смешивать с содержательной научной экспертизой каждого отдельного измеренного значения. Автоматизированные процедуры могут проверять структуру пакета, соответствие описанию, полноту метаинформации и другие формальные характеристики, однако научная оценка достоверности результатов остается связана с ответственностью коллектива, сформировавшего данные, и с последующей предметной экспертизой при их использовании.

Центры разработки продуктовых и аналитических решений являются независимыми участниками второго уровня платформы. Они не образуют единой административно управляемой системы и могут иметь различную специализацию. Центры Разработки используют доступные им данные для решения научных, аналитических, организационных, общественно значимых, технологических и прикладных задач и создают соответствующие производные результаты. Как указывалось выше, в качестве таких центров будут выступать, ЦЦТ ПКП НИУ ВШЭ, Экспертный Центр при Институте океанологии им. П.П.Ширшова РАН, а также другие организации, обладающие необходимой компетенцией. Конкретный состав сети не является закрытым и может расширяться по мере появления новых задач и участников.

3.7.2 Принципы и направления развития платформы

Развитие платформы ведется эволюционно, опираясь на фактически поступающие данные и реальные сценарии их использования. На первом уровне это означает последовательное расширение таксономии и системы типизации данных, совершенствование автоматизированного извлечения метаданных, развитие правил гармонизации для устойчиво стандартизируемых классов наблюдений и сохранение возможности принимать уникальные или экспериментальные данные без предварительного приведения к жесткой схеме.

Отдельным направлением является превращение накопленного массива из

файлового хранилища в полноценный информационный ресурс. Для этого развиваются средства смысловой индексации и поиска, фильтрации по полигонам, типам данных, периодам наблюдений, методикам и другим признакам, а также пользовательское представление собственных загруженных пакетов и тех данных других полигонов, к которым пользователю предоставлен доступ. Параллельно расширяется техническая возможность приема и долговременного хранения массивов данных большого объема.

Для сети Центров Разработки ключевым направлением развития являются стандартизированные программные механизмы взаимодействия с ЭЦ/CDCS. API и связанные с ним механизмы авторизации должны позволять аналитическим и продуктовым системам получать разрешенные данные и метаданные без построения отдельных каналов обмена для каждого проекта. При этом технический доступ непосредственно связан с юридически установленным режимом использования конкретного пакета данных.

Правовая модель развивается одновременно с техническими возможностями платформы. Для масштабируемой работы применяются типовые правила, определяющие режимы доступа, цитирование, временные ограничения, использование данных при создании производных результатов и специальные условия коммерческого применения. Наличие такой рамки позволяет защищать интересы полигонов и научных коллективов и одновременно открывать возможность содержательного межполигонного анализа и создания новых решений на базе накопленных результатов.

В результате Единая цифровая платформа формируется не как одна монолитная информационная система, а как развиваемая архитектура совместной работы с данными. Ее устойчивой основой являются инфраструктура ЭЦ/CDCS и единые правила обращения с данными, а прикладное развитие обеспечивается открытой для расширения сетью независимых Центров Разработки. Такая организация позволяет сохранять ответственность и научный приоритет источников данных, последовательно повышать сопоставимость накопленных материалов и одновременно использовать общий результат программы карбоновых полигонов для решения более широкого круга научных, аналитических и практических задач.

04

РАЗВИТИЕ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПОТОКОВ КЛИМАТИЧЕСКИ АКТИВНЫХ ГАЗОВ И СОЗДАНИЕ ЦИФРОВЫХ ДВОЙНИКОВ ЭКОСИСТЕМ



4.1 РОЛЬ МОДЕЛИРОВАНИЯ В РАЗВИТИИ ПРОГРАММЫ КАРБОНОВЫХ ПОЛИГОНОВ

Развитие системы карбоновых полигонов на современном этапе и их трансформация в экосистемные лаборатории широкого профиля предполагает дальнейшее развитие математического моделирования потоков парниковых газов и функционирования экосистем. Наблюдения, получаемые на полигонах, имеют принципиальное значение для количественной характеристики углеродного цикла, однако даже при широком развитии сети наблюдений они не могут обеспечить полное описание пространственной и временной изменчивости потоков на масштабах, превышающих масштаб непосредственных измерений. Даже при существенном расширении сети наблюдений непосредственные измерения не способны обеспечить непрерывное описание потоков CO_2 , CH_4 , N_2O и других компонентов углеродного и азотного циклов на масштабах отдельных ландшафтов, регионов и страны. В этой связи математическое моделирование должно рассматриваться как механизм интеграции разнородных наблюдений и как необходимый инструмент перехода от системы локальных измерений к непрерывному пространственно-временному описанию функционирования экосистем.

4.2 КРИТИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ РАЗВИТИЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ

4.2.1 Процесс-ориентированные и регионально-ориентированные модели

Особое значение имеет развитие процесс-ориентированных моделей, описывающих механизмы формирования потоков парниковых газов во взаимосвязи с состоянием растительности, почв, гидрологическим режимом и метеорологическими условиями. Перспективные модели должны обеспечивать сопряженное описание продукционных и деструкционных процессов, фотосинтеза и дыхания растений, дыхания почв, трансформации органического вещества, образования и окисления CH_4 , процессов минерализации и иммобилизации азота, нитрификации и денитрификации. При этом принципиально важно перейти от моделирования отдельных потоков к описанию взаимосвязанной динамики углеродного и азотного циклов, поскольку изменение доступности азота, продуктивности растительности и скорости разложения органического вещества непосредственно определяет способность экосистем поглощать или выделять парниковые газы.

Особую научную задачу представляет развитие моделей для пространственно неоднородных природных систем. Современные ландшафты характеризуются мозаичной структурой растительности, почв, гидрологических и микроклиматических условий, вследствие чего величины потоков могут существенно различаться даже на небольших расстояниях.

Для болот принципиальное значение имеют различия между микроландшафтами, определяющие соотношение аэробных и анаэробных процессов и, соответственно, потоков CO_2 и CH_4 . Для лесных экосистем необходимо учитывать породный состав, возрастную структуру, состояние древостоев, нарушения и пожары. Для агроландшафтов — структуру землепользования, севообороты, обработку почвы, внесение удобрений и водный режим. Поэтому дальнейшее развитие моделей должно быть направлено на переход от условно однородных модельных ячеек к пространственно распределенным моделям, способным воспроизводить функционирование экосистем с учетом их реальной ландшафтной структуры.



Для территории России особое место в данной системе должно занимать моделирование углеродного цикла в зоне многолетней мерзлоты.

Потепление климата, изменение продолжительности сезонного протаивания, деградация мерзлоты, перераспределение влаги и изменение температурного режима



почв способны приводить к нелинейной трансформации потоков CO_2 и CH_4 . В связи с этим модели должны учитывать не только современное состояние мерзлотных экосистем, но и динамику мерзлотных процессов, включая изменение мощности сезонно-талого слоя, глубины промерзания, гидрологического режима и доступности ранее захороненного органического вещества. Наиболее перспективным видится сопряжение моделей тепловой динамики многолетней мерзлоты с моделями углеродного и азотного циклов, что позволит перейти от эмпирической оценки влияния потепления к количественному прогнозированию трансформации источников и поглотителей парниковых газов.

4.2.2 Моделирование обратных связей в экосистемах

При этом перспективные модели должны быть ориентированы не только на воспроизведение уже проводимых изменений, но и на оценку реакции экосистем на ожидаемую трансформацию климатических условий. Принципиальное значение приобретает моделирование потоков парниковых газов при различных сценариях изменения температуры, режима осадков, продолжительности вегетационного периода, частоты и интенсивности экстремальных явлений, а также изменения гидрологического и мерзлотного режимов. Это позволит оценивать возможную трансформацию углеродного баланса экосистем в средне- и долгосрочной перспективе и выявлять условия, при которых поглотители парниковых газов могут переходить в их источники.

Особого развития требует направление, связанное с моделированием потоков парниковых газов в водных экосистемах, включая естественные озера, реки, водохранилища и прибрежно-шельфовые зоны. В отличие от наземных экосистем, водные объекты характеризуются сложной пространственной структурой потоков парниковых газов, в которой необходимо одновременно учитывать поступление органического вещества с водосборной территории, его транспорт и трансформацию в водной толще и донных отложениях, первичную продукцию, минерализацию, газообмен с атмосферой и вынос углерода за пределы исследуемой системы. В результате эмиссия CO_2 и CH_4 с поверхности водоема представляет собой лишь один из компонентов общего углеродного баланса, а ее корректная оценка требует учета сопряженных процессов в пределах всего водосборного бассейна.

4.2.3 Особенности развития моделирования для различных типов ландшафтов

Для озер и водохранилищ принципиальное значение имеет развитие моделей, учитывающих вертикальную и горизонтальную неоднородность водной толщи, сезонную стратификацию, температурный и кислородный режимы, динамику органического вещества и донных отложений. Особую сложность представляет моделирование CH_4 , поскольку его образование, окисление и транспорт в водной толще могут происходить одновременно, а поступление CH_4 в атмосферу определяется не только диффузионным газообменом, но и быстрыми транспортными механизмами, включая пузырьковую эмиссию. Для водохранилищ эти процессы дополнительно зависят от морфометрии водоема, режима регулирования стока, колебаний уровня воды, времени водообмена и характера затопленных органических субстратов. Поэтому перспективные модели должны рассматривать водохранилище как динамическую биогеохимическую систему, состояние которой определяется взаимодействием климатических условий и режима эксплуатации водного объекта.

Особое внимание целесообразно уделить моделированию углеродного обмена в крупных речных системах и каскадах водохранилищ. Изменение гидрологического режима, времени пребывания воды и интенсивности транспорта растворенного и взвешенного органического углерода способно существенно менять соотношение между его экспортом, накоплением и минерализацией. В этой связи для крупных водных систем необходимо развивать модели, связывающие процессы на водосборе с последующей трансформацией углерода в русловой сети, озерах и водохранилищах. Такой подход позволит перейти от оценки отдельных водных объектов к моделированию непрерывного пространственного потока углерода от наземных экосистем через речные системы в конечные водоемы и моря.

Отдельный класс задач связан с прибрежными и шельфовыми зонами, где континентальный и океанический компоненты углеродного цикла тесно взаимодействуют. Здесь необходимо учитывать поступление растворенного и взвешенного углерода с речным стоком, обмен между водной толщей и донными отложениями, биологическую продукцию, минерализацию органического вещества, вертикальный и горизонтальный перенос водных масс и газообмен с атмосферой. Для

северных морей России дополнительное значение имеют сезонная динамика ледового покрова, температура воды, изменение продолжительности безледного периода и деградация прибрежной мерзлоты. Развитие соответствующих моделей позволит оценивать не только локальные потоки CO_2 и CH_4 на отдельных участках шельфа, но и роль прибрежно-шельфовых систем в региональном углеродном балансе.

Для водных объектов особенно важным является сопряжение биогеохимических моделей с гидродинамическими моделями. Пространственное распределение потоков парниковых газов в озерах, водохранилищах и шельфовых зонах во многом определяется движением водных масс, поэтому использование только локальных биогеохимических зависимостей неизбежно ограничивает возможности пространственного и временного масштабирования. Сопряженная гидродинамико-биогеохимическая модель позволит описывать перенос растворенных и взвешенных форм углерода, их трансформацию и последующий обмен с атмосферой в единой пространственно распределенной системе. При этом данные дистанционного зондирования, автоматических станций, буйковых комплексов, судовых измерений и дистанционных измерений концентраций могут использоваться для параметризации и регулярной коррекции модельного состояния.

Развитие данного направления имеет принципиальное значение для получения целостной оценки национального углеродного баланса, поскольку водные экосистемы не являются пассивным промежуточным



звеном между наземными системами и атмосферой. Они способны существенно изменять формы существования углерода, время его удержания в системе и соотношение между его накоплением, трансформацией, выносом и эмиссией в атмосферу. Поэтому включение озер, водохранилищ, речных систем и шельфовых зон в единую модельную архитектуру карбоновых полигонов позволит перейти от оценки потоков отдельных экосистем к воспроизведению пространственно связанного континуума «водосбор — река — водоем — шельф — атмосфера». Именно такой подход представляется необходимым для получения физически согласованных оценок регионального и национального углеродного баланса и для выявления роли водных систем в изменении потоков парниковых газов в условиях меняющегося климата.

4.2.4 Метагеномные данные как обязательный элемент параметризации моделей

Точность процесс-ориентированных моделей (4.2.1) в значительной степени определяется корректностью параметризации биологических механизмов образования и потребления парниковых газов, которые в подавляющем большинстве современных моделей задаются усредненными эмпирическими коэффициентами, не учитывающими фактический состав и функциональную активность микробных сообществ конкретного полигона. Между тем, эмиссия и поглощение CH_4 и N_2O напрямую определяются активностью специфических функциональных генов почвенной и водной микробиоты (в частности, *mcrA* — метаногенез, *rpoA* — метанотрофия, *nosZ* — денитрификация). Без учета этих данных модели вынуждены опираться на статичные



региональные допущения, что ограничивает их способность воспроизводить реакцию экосистем на изменение климатических условий, землепользования или технологий природно-климатических проектов.

В этой связи метагеномный и метатранскриптомный мониторинг должен рассматриваться не как самостоятельное и опциональное направление исследований (см. 5.1), а как важный источник входных данных для процесс-ориентированных и регионально-ориентированных моделей, а также для последующего создания цифровых двойников экосистем (4.4).

Приоритетными задачами являются:

1. регулярный (не реже одного раза в сезон) отбор проб для метагеномного анализа на ключевых полигонах одновременно с измерениями потоков методом вихревой ковариации, что позволит статистически сопоставлять динамику функциональных генов с фактическими потоками CH_4 и N_2O ;
2. включение показателей относительной численности и экспрессии ключевых функциональных генов в состав параметров процесс-ориентированных моделей наравне с гидрологическими и метеорологическими переменными;
3. формирование в рамках Единой цифровой платформы (раздел 3) отдельного класса данных «микробиом/метагеном», гармонизированного и связываемого с соответствующими потоковыми измерениями того же полигона и периода, что обеспечит воспроизводимость и повторное использование этих данных Центрами Разработки при калибровке моделей;
4. развитие гибридных моделей (см. 4.3.4), в которых генетические маркеры используются как дополнительный входной слой для алгоритмов машинного обучения, восстанавливающих нелинейные зависимости между составом микробных сообществ и величиной потоков парниковых газов.

Реализация этого направления повышает прогностическую способность моделей и цифровых двойников экосистем, позволяя переходить от эмпирических корреляций к причинно-обоснованному описанию биологических механизмов формирования углеродного и азотного баланса.

4.3 РАСШИРЕНИЕ ФУНКЦИОНАЛА ИСПОЛЬЗУЕМЫХ МОДЕЛЕЙ

4.3.1 От моделирования углеродного цикла к полноценным экосистемным моделям

Отдельным направлением должно стать моделирование динамики растительности как одного из ключевых факторов пространственно-временной изменчивости углеродного баланса. Изменение температуры, водного режима, продолжительности вегетационного периода, частоты засух, пожаров и других экстремальных воздействий приводит к перестройке продуктивности и структуры растительного покрова, которая, в свою очередь, изменяет обмен парниковыми газами между экосистемой и атмосферой. Поэтому перспективные модели должны учитывать не только реакцию существующей растительности на климатические факторы, но и постепенную трансформацию самой структуры экосистем. Это особенно важно для бореальных лесов, тундровых и лесотундровых экосистем, болот и агроландшафтов, где климатические изменения могут сопровождаться переходом экосистемы в качественно иное состояние.

Важным направлением должно стать моделирование не только непосредственного отклика потоков парниковых газов на изменение отдельных климатических факторов, но и последовательной трансформации экосистем, сопровождающейся изменением самих механизмов углеродного обмена. В этом случае климатический сценарий рассматривается не как внешняя заданная характеристика, а как фактор, способный изменять состояние экосистемы, ее структуру и набор доминирующих биогеохимических процессов. Такой подход особенно важен при оценке долгосрочной динамики углеродного баланса, поскольку реакция экосистемы на изменение климата может быть нелинейной и включать пороговые эффекты, запаздывания и переходы между различными функциональными состояниями.

4.3.2 Пространственно-временное масштабирование

Принципиально важной задачей является разработка методов пространственно-временного масштабирования результатов наблюдений. Измерения на карбоновых полигонах должны использоваться не только для характеристики конкретной территории, но и для параметризации и верификации

моделей, позволяющих распространять полученные закономерности на территории, непосредственно не охваченные наблюдениями. В этом отношении карбоновые полигоны могут рассматриваться как система модельных эталонных объектов, на которых устанавливаются количественные связи между состоянием экосистемы и потоками парниковых газов. При дальнейшем использовании дистанционного зондирования и пространственно распределенных моделей эти связи могут переноситься на региональный и национальный масштаб.

Такое масштабирование предполагает тесную интеграцию математического моделирования с данными дистанционного зондирования Земли. Спутниковые системы обеспечивают информацию о состоянии и динамике растительного покрова, температуре поверхности, влажности, фенологии, структуре лесов, площади и состоянии водных объектов и других параметрах, которые могут выступать пространственными предикторами потоков парниковых газов. Беспилотные летательные аппараты, в свою очередь, позволяют получать значительно более детальную информацию на промежуточном масштабе, от отдельных участков экосистем до ландшафтных комплексов. Развитие моделей должно обеспечить возможность совместной интерпретации этих данных с наземными измерениями, формируя непрерывное описание потоков от масштаба элементарной площадки до региональной территории.

4.3.3 Инверсионное моделирование

Особое значение в этой системе приобретает развитие инверсионного моделирования. В отличие от прямых моделей, рассчитывающих потоки на основе известных характеристик экосистемы, инверсионные методы позволяют восстанавливать пространственное распределение источников и поглотителей по проводимым изменениям концентраций парниковых газов в атмосфере. Это открывает принципиально новые возможности для перехода от локального измерения потоков к их региональной оценке. Данные высотных мачт, атмосферных наблюдений, наземных станций, БПЛА и спутниковых систем могут рассматриваться как различные уровни единой системы ограничений для обратной задачи. При этом перспективным является развитие иерархических инверсионных моделей, в которых информация последовательно объединяется на различных пространственных и временных масштабах.

Развитие инверсионных подходов особенно актуально для территорий с высокой пространственной неоднородностью и ограниченной плотностью наземных наблюдений. В таких условиях модель должна не только восстанавливать наиболее вероятное пространственное распределение потоков, но и оценивать неопределенность получаемых результатов. Оценка неопределенности должна стать обязательной составляющей модельных продуктов, поскольку она определяется не только погрешностью наблюдений, но и неопределенностью параметров моделей, неполнотой представления биогеохимических процессов, пространственной неоднородностью экосистем и ограничениями используемых атмосферных моделей. В перспективе именно вероятностное описание потоков и их неопределенности должно стать основой для сопоставления различных источников информации и количественной оценки надежности национальных и региональных углеродных балансов.

4.3.4 Использование искусственного интеллекта в моделировании

Важным направлением развития модельных исследований является использование методов машинного обучения для анализа накопленных массивов наблюдений. Большой объем разнородных данных, формируемый карбоновыми полигонами, создает условия для применения методов искусственного интеллекта как при решении прямых задач прогнозирования потоков, так и при решении обратных задач их восстановления. Машинное обучение может использоваться для выявления нелинейных зависимостей между потоками и характеристиками экосистем, восстановления разрозненных временных рядов, пространственной интерполяции наблюдений, оценки параметров процесс-ориентированных моделей и построения кратко- и среднесрочных прогнозов.

При этом перспективным представляется не замещение физически обоснованных моделей методами машинного обучения, а формирование гибридного класса моделей, сочетающих физическое описание биогеохимических процессов с data-driven подходами. Физическая модель в данном случае определяет структуру и ограничения возможных состояний системы,

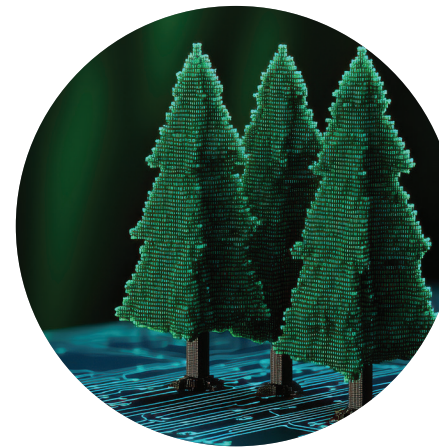
тогда как алгоритмы машинного обучения позволяют выявлять сложные зависимости, которые трудно формализовать на основе существующих представлений о процессах. Такой подход особенно перспективен для описания нелинейных переходов и экстремальных состояний экосистем, для которых традиционные параметризации могут демонстрировать существенные ограничения.

Отдельной задачей является разработка моделей, способных работать с наблюдениями различной природы и различного пространственно-временного разрешения. В настоящее время наземные измерения, данные высотных мачт, БПЛА и спутниковых систем принципиально различаются по масштабу, частоте наблюдений и характеру неопределенности. Необходимы методы ассимиляции этих данных в единую модельную систему, позволяющие регулярно уточнять состояние экосистемы по мере поступления новых наблюдений. В результате может быть сформирован динамический модельный контур, в котором наблюдения используются для обновления параметров и состояния модели, а модель, в свою очередь, позволяет определять пространственные области и временные интервалы, где дополнительные наблюдения имеют наибольшую информационную ценность.

4.4 СОЗДАНИЕ ЦИФРОВЫХ ДВОЙНИКОВ ЭКОСИСТЕМ

4.4.1 Моделирование, как путь к созданию цифровых двойников экосистем

Наиболее перспективным развитием данного подхода является создание пилотных цифровых двойников типовых экосистем России. В отличие от статической цифровой карты или набора модельных расчетов, цифровой двойник должен представлять собой динамическую модельно-информационную систему, воспроизводящую текущее состояние экосистемы на основе непрерывно поступающих наблюдений и позволяющую рассчитывать ее возможную эволюцию при различных внешних воздействиях. Такая система должна объединять данные мониторинга, процесс-ориентированные модели, дистанционное зондирование, атмосферные наблюдения и методы машинного обучения в едином вычислительном контуре.



“

В качестве пилотных объектов для создания таких цифровых двойников целесообразно рассматривать наиболее репрезентативные для территории России и одновременно наиболее чувствительные к климатическим изменениям экосистемы — бореальные леса в зоне многолетней мерзлоты, агроландшафты и болотные комплексы.

Для бореальных лесов цифровой двойник должен позволять воспроизводить сопряженную динамику растительности, почвенного углерода, пожаров, мерзлотных процессов и потоков CO_2 и CH_4 . Для агроландшафтов – учитывать влияние способов обработки почвы, структуры севооборотов, применения удобрений и водного режима на углеродный и азотный баланс. Для болот – описывать связь между гидрологическим режимом, температурой, состоянием растительности и эмиссией и поглощением CO_2 и CH_4 .

Создание цифровых двойников имеет значение не только для развития методов мониторинга, но и для перехода к новому типу экологического моделирования, ориентированному на проведение виртуальных экспериментов и исследование возможных траекторий развития экосистем. В модельной среде уже возможно оценивать реакцию экосистем на различные сценарии изменения климатических условий и управления территорией, включая изменения температурного и водного режимов, режима осадков, продолжительности вегетационного периода и частоты экстремальных природных явлений, а также сравнивать альтернативные стратегии природопользования и оценивать их долгосрочные последствия для углеродного и азотного баланса.

При этом цифровой двойник позволяет анализировать не только изменение величины отдельных потоков парниковых газов, но

и возможную структурную перестройку экосистем, изменение соотношения между источниками и поглотителями парниковых газов, возникновение нелинейных откликов и переходов между различными функциональными состояниями. Это создает возможность исследовать состояния и траектории развития экосистем, которые еще не наблюдались непосредственно, и оценивать устойчивость их углеродного баланса при различных сочетаниях климатических воздействий и сценариев управления. В этом смысле цифровой двойник становится инструментом не только реконструкции текущего состояния экосистемы, но и количественного анализа ее возможной динамики, позволяющим научно обосновывать долгосрочные решения в области управления природными ресурсами и адаптации к изменению климата.

Дальнейшее развитие таких систем может привести к формированию концепции «виртуальных экосистем», в которых наблюдаемое состояние природной территории постоянно сопоставляется с множеством возможных сценариев ее дальнейшей динамики. Это позволит оценивать не только величину текущих потоков парниковых газов, но и устойчивость экосистемы, вероятность перехода между различными функциональными состояниями, чувствительность углеродного баланса к отдельным климатическим факторам и потенциальную эффективность природно-климатических мероприятий. Для природных ресурсов такой подход открывает возможность перехода от реагирования на уже произошедшие изменения к прогнозному управлению, основанному на количественной оценке последствий принимаемых решений.

В перспективе аналогичные модельные подходы целесообразно распространить на водные и урбанизированные экосистемы. Внутренние водоемы, речные системы и прибрежные территории требуют отдельного модельного описания в связи со значительной ролью водного транспорта углерода и сложным соотношением процессов продукции, минерализации и эмиссии CH_4 . Для городских территорий актуальным является развитие моделей, объединяющих углеродный и тепловой баланс, выбросы от различных секторов городской экономики и роль зеленой инфраструктуры. В данном случае цифровой двойник может использоваться для анализа сценариев пространственного развития города, изменения транспортной системы, развития зеленых зон и мероприятий по снижению эффекта городского теплового острова.

4.4.2 Взаимосвязь и взаимообусловленность различных блоков развития моделирования в рамках проекта

Таким образом, дальнейшее развитие математического моделирования в системе карбоновых полигонов целесообразно строить как последовательный переход от моделей отдельных процессов к сопряженным моделям функционирования экосистем, от локального описания – к пространственно распределенным системам, от прямых расчетов – к интегрированным прямым и обратным задачам, от отдельных рядов наблюдений – к ассимиляции многомасштабных данных и, наконец, от ретроспективного анализа – к динамическим цифровым двойникам и прогнозным виртуальным экосистемам. Принципиальным результатом такого развития станет возможность количественно связать проводимые изменения природных систем с механизмами формирования потоков парниковых газов и их пространственным проявлением на региональном и национальном уровнях.

В таком представлении карбоновые полигоны становятся не только инфраструктурой для получения эмпирических данных, но и базовой экспериментальной средой для развития отечественных моделей функционирования экосистем. Каждый полигон формирует набор данных для параметризации и проверки моделей, модели обеспечивают перенос результатов наблюдений на более крупные пространственные масштабы, а цифровые двойники создают возможность прогнозировать дальнейшую динамику экосистем и исследовать последствия различных сценариев их изменения. Формирование такого замкнутого цикла «наблюдение – моделирование – прогноз – дополнительное наблюдение» является одним из наиболее перспективных направлений развития современной системы мониторинга углеродного баланса и парниковых газов и создает основу для перехода к научно обоснованному прогнозированию углеродного баланса природных систем России.

05

ПЕРСПЕКТИВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ, СОЗДАНИЕ НОВЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ

Трансформация карбоновых полигонов в комплексные экологические обсерватории требует развития новых направлений исследований, выходящих за контур мониторинга потоков климатически активных газов и оценок углеродного баланса. Важнейшим направлением является исследование и оценка биологических механизмов, формирующих углеродный баланс. В этом смысле геномные исследования на карбоновых полигонах являются одним из наиболее перспективных направлений расширения их деятельности. Геномные исследования микробиоты почвы, бентоса, водных экосистем и других биоконплексов превращаются в критически важный компонент климатологии и мониторинга парниковых газов. Понимание генетического разнообразия и функциональных генов микробных сообществ напрямую определяет прогностическую способность моделей углеродного цикла, позволяет разрабатывать управленческие стратегии по секвестрации углерода и достоверно оценивать эффективность низкоуглеродных технологий. Интеграция генетических данных в цифровые двойники экосистем на карбоновых полигонах становится необходимостью, а не опцией, для обеспечения климатической политики Российской Федерации надежной научной базой.

5.1 МЕТАГЕНОМИКА И ФУНКЦИОНАЛЬНАЯ ГЕНОМИКА ПОЧВ

Целью развития данного направления является создание высокодетализированных карт почвенной микробиоты, анализ её функциональной активности, ассоциированной с эмиссией/поглощением метана (CH_4) и закиси азота (N_2O). Это позволит перейти от эмпирических измерений к прогнозному моделированию. Для развития этого направления важными научными и технологическими задачами являются:

1. оснащение ключевых полигонов (особенно агро- и болотных) оборудованием для сбора, хранения проб и последующего высокопроизводительного секвенирования,
2. разработка биоинформатических методик для идентификации микробных маркеров «здоровья» почвы, включая анализ экспрессии ключевых функциональных генов (*mscA*, *pmoA*, *nosZ* и др.) для сопоставления с данными прямых измерений потоков газов (Eddy Covariance);
3. создание эталонных коллекций микроорганизмов-деструкторов и секвестраторов.



Результатом развития направления станет создание практических рекомендаций по климатическим проектам, а также сельхозпрактикам, снижающим эмиссию N_2O (оптимизация азотных удобрений), биопрепараты для усиления секвестрации углерода в почвах и увеличения эффективности фосфатных удобрений. Формирование биологического слоя данных для «цифровых двойников» экосистем, позволяющего прогнозировать устойчивость почвенного пула углерода.



5.2 ГЕНОМНЫЕ БАНКИ И СЕЛЕКЦИЯ СУПЕРПОГЛОТИТЕЛЕЙ

Целью направления является ускоренное создание растительного материала с повышенным потенциалом секвестрации углерода и устойчивостью к абиотическим стрессам. Для достижения этой цели будут решаться следующие задачи:

1. систематизация и расширение коллекций быстрорастущих видов: гибридный тополь, триплоидная осина, мискантус, павловния,
2. проведение полногеномного секвенирования и GWAS-анализа (полногеномный поиск ассоциаций) для выявления генов, ответственных за скорость роста и лигнификацию,
3. дальнейшее развитие технологий клонального микроразмножения *in vitro* на базе полигонов.

Результатом развития данного направления станет обоснование получения коммерческих сортов и технологий для ремедиации деградированных почв и создания высокопродуктивных углерододепонирующих плантаций на малопродуктивных землях.

“

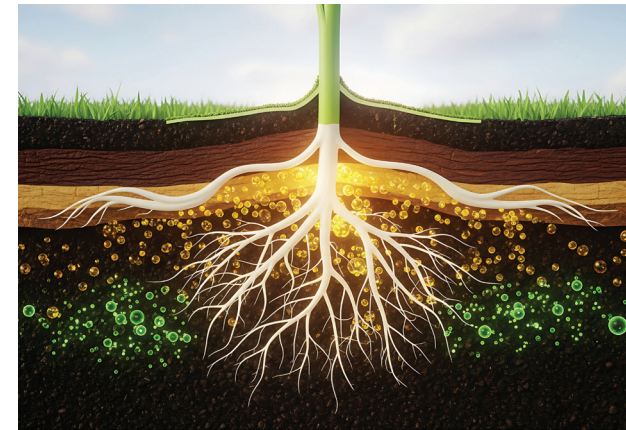
Создание геномных банков и селекция суперпоглопителей позволит получить коммерческие сорта для создания высокопродуктивных углерододепонирующих плантаций на малопродуктивных землях и ремедиации деградированных почв.

5.3 МОНИТОРИНГ БИОРАЗНООБРАЗИЯ МЕТОДАМИ eDNA

Цель реализации данного направления — оперативная, неинвазивная и высокоточная оценка состояния биоразнообразия как индикатора устойчивости экосистем и результативности восстановительных мероприятий. Основными задачами, решаемыми в рамках направления, являются:

1. внедрение стандартизированных протоколов отбора проб воды и почвы для eDNA-анализа на карбоновых полигонах,
2. создание референсных генетических баз данных для ключевых таксонов (рыбы, амфибии, беспозвоночные, микроорганизмы) различных биомов России, гармонизированных с международными стандартами для обеспечения верификации данных в рамках «зеркальных» полигонов.

Результатом развития направления станет формирование витрины сервисов для оценки эффективности природоохранных и лесоклиматических проектов, инструменты раннего обнаружения патогенов леса и вредителей, а также верифицированные данные для экологической отчетности индустриальных партнеров в части сохранения биоразнообразия.



5.4 МЕТАГЕНОМНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПОЧВ ДЛЯ КОМПЛЕКСНОЙ ОЦЕНКИ СОСТОЯНИЯ АГРОЭКОСИСТЕМ

Развитие метагеномных исследований почвенного микробиома на карбоновых полигонах должно быть направлено на расширение научных возможностей оценки состояния и функционирования агроэкосистем. Исследование состава и функционального потенциала почвенных микробных сообществ может стать важным дополнением к традиционным физическим, химическим и биогеохимическим характеристикам почв.

Для аграрных карбоновых полигонов особое значение имеет изучение взаимосвязи между применяемыми агротехнологиями, состоянием почвенного микробиома, трансформацией органического вещества и азота, продуктивностью агроэкосистем и потоками климатически активных газов.

Основными задачами данного направления являются:

- формирование сопоставимых баз данных о составе и функциональных характеристиках почвенного микробиома в различных природно-климатических условиях и при применении различных систем земледелия;
- выявление микробиологических показателей, характеризующих состояние и устойчивость почв, а также ранние стадии деградационных процессов;
- изучение влияния агротехнологий на микробиологические механизмы трансформации углерода и азота и связанные с ними процессы эмиссии и поглощения газов;

- интеграция результатов метагеномных исследований с данными о физических и химических свойствах почв, растительном покрове, гидрологическом режиме и потоках парниковых газов.

Развитие данного направления позволит повысить научную обоснованность оценки устойчивости агроэкосистем и эффективности почвозащитных и ресурсосберегающих технологий, а также сформировать новые показатели для мониторинга деградации и восстановления земель.

5.5 РАЗВИТИЕ ТЕХНОЛОГИЙ ЦИРКУЛЯРНОЙ БИОЭКОНОМИКИ

Целью этого технологического направления является апробация и сертификация технологий утилизации отходов с положительным климатическим эффектом. Для этого будут решаться следующие задачи:

1. создание и испытание пилотных установок пиролиза сельхозотходов с оценкой выхода биоугля и его стабильности в почвах,
2. испытания биореакторов для переработки навоза в биогаз
3. и органические удобрения с точным замером сокращения эмиссии CH_4 и N_2O ,
4. исследование использования водорослевой биомассы в производстве кормов, биополимеров и стройматериалов.

Это позволит ускорить количественную оценку секвестрационного потенциала макрофитов (водоросли, морские травы, приморские тростники) в морях России. Как результат, мы сможем форсировать разработки технологий картографирования и устойчивого культивирования ламинарии и других видов макроводорослей для целей секвестрации и биоэкономики. Для водных объектов это позволит форсировать изучение роли фито- и бактериопланктона, процессов дегазации CO_2 и CH_4 с применением современных методов ИИ, геномного баркодирования и геномных банков.

5.6 ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПОТЕНЦИАЛА БОТАНИЧЕСКИХ САДОВ ДЛЯ СОЗДАНИЯ ДОПОЛНИТЕЛЬНЫХ ПЛОЩАДОК НАБЛЮДЕНИЙ И РЕАЛИЗАЦИИ НОВЫХ НАПРАВЛЕНИЙ В РАБОТЕ ПРОЕКТА КАРБОНОВЫХ ПОЛИГОНОВ

Ботанические сады выступают как хранилища уникальной генетической информации, однако их научный потенциал в области климатического мониторинга остается недостаточно реализованным. Учитывая, что сеть карбоновых полигонов с одной стороны, обладает развитой инфраструктурой для измерения потоков парниковых газов, а с другой, предполагает развитие в направлении более широкого экосистемного анализа, интеграция работ карбоновых полигонов с деятельностью ботанических садов представляется крайне перспективной.

Такая интеграция позволит достаточно быстро закрыть пробелы в области

- изучения генетических и молекулярных механизмов, лежащих в основе углеродной секвестрации растениями и почвенной микробиотой;
- долгосрочного мониторинга динамики углеродного баланса для растительных коллекций, представляющих разные таксономические группы;
- прямой верификации гипотез о роли генетического разнообразия в устойчивости экосистем к климатическим стрессорам.

В рамках развития деятельности карбоновых полигонов и расширения их задач интеграция работ с ботаническими садами позволит развернуть геномный мониторинг потоков парниковых газов на основе ботанических коллекций, верифицировать технологии создания растительного материала с повышенным потенциалом углеродной секвестрации и выстроить научный фундамент для цифровых двойников ботанических садов, калиброванных на реальных потоковых и генетических данных.



Интеграция работ с ботаническими садами позволит развернуть геномный мониторинг потоков парниковых газов на основе ботанических коллекций и верифицировать технологии создания растительного материала с высоким потенциалом углеродной секвестрации.



06

УЧАСТИЕ КАРБОНОВЫХ ПОЛИГОНОВ В РАЗРАБОТКЕ И АКТУАЛИЗАЦИИ РЕГИОНАЛЬНЫХ ПЛАНОВ АДАПТАЦИИ

6.1 ОБОСНОВАНИЕ СВЯЗИ ЗАДАЧ ПОЛИГОНОВ С РАЗРАБОТКОЙ И АКТУАЛИЗАЦИЕЙ РЕГИОНАЛЬНЫХ ПЛАНОВ АДАПТАЦИИ К ИЗМЕНЕНИЯМ КЛИМАТА

Участие карбоновых полигонов в формировании и реализации региональных планов адаптации к изменениям климата субъектов РФ, в которых созданы полигоны, является одним из важнейших перспективных направлений работ операторов полигонов на ближайшее время.

На данный момент в Российской Федерации процесс подготовки и актуализации региональных планов адаптации к изменениям климата находится на стадии активного развития, но характеризуется неравномерностью реализации в различных субъектах РФ. Это реализуется в соответствии со Стратегией низкоуглеродного развития Российской Федерации до 2050 года (утв. распоряжением Правительства РФ от 29 октября 2021 г. № 3052-р), Планом мероприятий по реализации Стратегии адаптации к изменениям климата до 2022 года (утв. распоряжением Правительства РФ от 25 декабря 2019 г. № 3183-р) и Климатической доктриной Российской Федерации (утв. распоряжением Президента РФ от 17 декабря 2009 г. № 861-рп, актуализируется).

В соответствии с данными документами все субъекты РФ обязаны подготовить или актуализировать собственные региональные планы адаптации. По данным Минэкономразвития около 50 субъектов РФ завершили первый цикл разработки и утверждения таких планов. Ещё 30 регионов находятся на стадии согласования проектов документов. Оставшиеся регионы включены в федеральную программу методического

сопровождения, в т.ч. с участием Росгидромета и научного сообщества (РАН, отраслевые НИИ, ведущие вузы).

Связь карбоновых полигонов и процесса разработки и актуализации региональных планов адаптации к изменениям климата — прямая и многоплановая. Они взаимно дополняют друг друга в рамках государственной климатической политики и реализации принципов устойчивого развития. Поскольку карбоновые полигоны — это специализированные исследовательские площадки, где ведётся комплексный мониторинг углеродного цикла: потоков парниковых газов между атмосферой, почвой, растительностью, водными объектами и человеком, а региональные планы адаптации — это документы стратегического планирования, направленные на оценку уязвимости региона к климатическим рискам (засухи, паводки, оттаивание мерзлоты, изменение продуктивности экосистем), разработку мер по снижению ущерба и повышению устойчивости социально-экономических систем, интеграцию климатической повестки в транспортную, энергетическую, промышленную, сельскохозяйственную и экологическую политику, то логическая и институциональная связь очевидна.



Важными направлениями участия полигонов в разработке и актуализации планов адаптации является предоставление научных данных, разработка и проверка климатически нейтральных технологий, поддержка системы мониторинга, регионального управления и отчетности.

6.2 ОСНОВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ УЧАСТИЯ ПОЛИГОНОВ В РАЗРАБОТКЕ И АКТУАЛИЗАЦИИ ПЛАНОВ АДАПТАЦИИ

Наиболее важными направлениями участия полигонов в разработке и актуализации планов адаптации являются следующие:

1. Предоставление научных данных для обоснования адаптационных мер. Поскольку карбоновые полигоны обеспечивают регионы достоверной научной информацией о реальном балансе углерода и парниковых газов на локальном и региональном уровне, о влиянии изменений климата на продуктивность экосистем, деградацию земель, гидрологические и термические процессы, о возможностях природных экосистем служить углеродными поглотителями, получаемые данные служат базой для моделей климатических рисков и выбора приоритетных направлений адаптации.
2. Разработка и проверка климатически нейтральных технологий. Поскольку на полигонах разрабатываются и тестируются адаптационные и смягчающие меры, например, восстановление торфяников для снижения выбросов метана, лесное и агролесное возобновление, климатически дружелюбные практики почвенного управления, технологии мониторинга углеродного следа предприятий, результаты этих экспериментов могут включаться в практические программы региональных адаптационных планов.
3. Обеспечение поддержки системы мониторинга и актуализации планов. Поскольку климатические параметры меняются во времени, планы адаптации должны также регулярно пересматриваться. В этом смысле карбоновые полигоны формируют динамические ряды наблюдений (в течение десятков лет), что позволяет сравнивать текущие данные с историческими, выявлять тенденции (увеличение эмиссий, изменение сезонности, деградация экосистем), вносить корректировки в региональные планы на основе объективных измерений, а не усреднённых или устаревших оценок.
4. Поддержка регионального управления и отчётности. Данные, получаемые на карбоновых полигонах, могут использоваться региональными органами

власти для подготовки экологических докладов и отчётов о климатических рисках, обоснования проектов «зелёного» финансирования (углеродные кредиты, климатические инвестиции, ESG-инициативы), участия в федеральной и международной системе учёта парниковых газов и «углеродного регулирования».

Существуют два возможных подхода к участию карбоновых полигонов в формировании и актуализации планов адаптации:

(а) участие в мероприятиях по отраслям с акцентом на:

- Сельское хозяйство (подверженность засухам, экстремальным осадкам, наводнениям)
- Лесной комплекс (пожары, увеличение предрасположенности)
- Прибрежные акватории (увеличение местного флеш-стока и загрязнение)
- Многолетняя мерзлота (увеличение опасностей для зданий, сооружений и несущей способности дорог)

(б) детальный анализ каждого мероприятия с точки зрения его возможного влияния на изменение регионального углеродного баланса и позиционирование карбонового полигона в плане адаптации, в частности:

- Лесозащита и ее учет в планах адаптации
- Осушка торфяников – как влияет и планируется ли?
- Рубки – как организованы, где, что будет если начнет расти молодой лес?
- Освоение береговой зоны, организация туристической инфраструктуры.

Конкретная реализация участия полигонов в формировании и актуализации планов адаптации будет включать

1. Взаимодействие с соответствующими департаментами региональных правительств (войти в соответствующие РГ);
2. Наполнение соответствующих мероприятий РПА задачами, связанными с мониторингом углеродного баланса региона;
3. Анализ и оценка планов адаптации, участие на каждом этапе;
4. Взаимодействие с бизнесом при (а) разработке и актуализации РПА и (б) выполнении планов;
5. Образовательная деятельность, подготовка кадров;
6. Проведение профильных для РПА мероприятий на полигонах.

07

ПОДГОТОВКА КАДРОВ ДЛЯ КЛИМАТИЧЕСКОЙ ЭКОНОМИКИ

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, геоинформационные технологии, технологии проведения измерений, искусственный интеллект и т.д.

Это требует адаптации существующих и разработки новых магистерских и аспирантских программ, консолидирующих знания из разных областей, что должно является совместными усилиями ведущих университетов и научных институтов для создания новых образовательных форматов, связанных с самими полигонами. Сегодня в образовательных и научных организациях, являющихся операторами полигонов, успешно реализуются образовательные программы как для бакалавриата, так и для магистратуры. Кроме того, на многих полигонах развиваются программы дополнительного образования по тематике климатических исследований и контроля за потоками парниковых газов. Общее количество программ и обучающих курсов приближается к сотне.

Большая часть разрабатываемых программ относится к направлениям экологии, гидрометеорологии, биологии и экономики. Важным является то, что уже сейчас разрабатываются и внедряются программы в области инженерных наук, а также метрологии и стандартизации, принципиально важные для

обеспечения качества измерений на полигонах. По уровню образования преобладают программы дополнительного образования и магистратуры. Это соответствует тому, что тематика пилотного проекта является междисциплинарной, что в известной степени ограничивает использование потенциала бакалавриата, нацеленного на базовые дисциплины.

Для дальнейшего развития пилотного проекта помимо специалистов в области мониторинга климатически активных газов и углеродного баланса, а также создания и развития природно-климатических проектов, потребуются специалисты в области инженерной экологии, биоинформатики и анализа адаптационных решений.

7.1 НОВЫЕ МАГИСТЕРСКИЕ ПРОГРАММЫ

7.1.1 Экосистемный мониторинг и управление природными территориями

Подготовка специалистов, которые умеют оценивать состояние экосистем в комплексе: потоки парниковых газов, состояние почв, гидрологию, биоразнообразие, антропогенную нагрузку и устойчивость ландшафтов. Эта программа должна соответствовать тому, что карбоновые полигоны постепенно превращаются из площадок только для измерения парниковых газов в многофункциональные научно-образовательные экосистемные обсерватории.



7.1.2 Почвы, биогеохимические циклы и климат

Фокус данной программы должен быть на почве как ключевом элементе климатически и экологически значимых процессов: углеродном балансе, азотном цикле, микробиоте, деградации и восстановлении почв. Эта программа нужна, поскольку для карбоновых полигонов почва – один из главных объектов наблюдения, а при расширении к экосистемной повестке значение почв только растёт.

7.1.3 Гидроэкология и климатическая устойчивость ландшафтов

Эта программа должна быть направлена на подготовку специалистов по взаимосвязи климата, водного режима, болотных, лесных, речных и агроландшафтных систем. Необходимость программы определяется тем, что без учета воды невозможно адекватно понимать ни углеродный баланс, ни устойчивость экосистем, ни риски деградации территорий.

7.1.4 Биоразнообразие, ДНК-мониторинг и эко системная диагностика

Здесь предполагается подготовка специалистов, которые используют классические и молекулярные методы для оценки состояния экосистем, видового разнообразия и биоиндикаторов климатических изменений.



Если полигоны становятся экосистемными лабораториями, то нужно измерять не только газы, но и биоту — от микроорганизмов до растительных и животных сообществ.

7.1.5 Устойчивое землепользование и природоориентированные решения

В рамках данной программы предполагается подготовка специалистов для проектирования и оценки практик, которые одновременно снижают климатические риски, восстанавливают экосистемы и поддерживают хозяйственную эффективность территорий. Подготовка специалистов позволит реализовать полигоны, как пространство для апробации решений: лесовосстановление, управление сельхозземлями, восстановление болот, рекультивация.

7.1.6 Экологические данные, ИИ и цифровые двойники экосистем

В рамках данной программы предполагается подготовка специалистов на стыке экологии и data science для создания цифровых моделей экосистем, прогнозов и систем поддержки принятия решений. Поскольку на полигонах формируются большие массивы разнородных данных: сенсоры, спутники, лабораторные анализы, беспилотники, метеоданные, нужны специалисты, умеющие консолидировать и совместно обрабатывать эти данные.

7.2 НОВЫЕ БАКАЛАВРСКИЕ ПРОГРАММЫ

1. Экология и климат природных систем. Базовая междисциплинарная программа по экологии, климату, почвам, воде, растительности и антропогенному воздействию.
2. Геоинформационные технологии и мониторинг окружающей среды. Подготовка специалистов по пространственным данным для задач мониторинга климата и экосистем.
3. Биоэкология и биомониторинг. Подготовка бакалавров для полевых и лабораторных исследований биоразнообразия,

биоиндикации и оценки состояния экосистем. Формирование навыков длительных наблюдений и комплексной оценки экосистем.

4. Природопользование и устойчивое развитие территорий. Программа для подготовки специалистов, способных работать на стыке экологии, управления территорией и прикладных природоохранных решений. Использование полигонов как модельных площадок для разработки сценариев управления.
5. Инженерные системы экологического мониторинга. Подготовка бакалавров, которые умеют работать с измерительной инфраструктурой: датчики, автоматические станции, каналы передачи данных, калибровка оборудования. Данная программа важна как база для подготовки тех специалистов, без которых сеть полигонов не может устойчиво работать.

7.3 СЕТЕВЫЕ И МОДУЛЬНЫЕ ФОРМАТЫ, КОТОРЫЕ ПРЕДСТОИТ ЗАЛОЖИТЬ ВО ВСЕ ПРОГРАММЫ

Чтобы программы не были рутинными дополнениями к уже существующим университетским программам, а были ориентированы на цели и задачи пилотного проекта, необходимо зафиксировать общую модель. В рамках этой общей модели будет существовать следующая структура сетевой реализации:

- Университетский модуль: фундаментальная подготовка, методы анализа, математический и цифровой инструментарий.
- Полигонный модуль: полевые практики, работа с оборудованием, сезонные измерительные кампании.
- Лабораторный модуль: обработка проб, молекулярные и химико-аналитические методы.
- Цифровой модуль: работа с базами данных, ГИС, моделированием, ИИ.
- Проектный модуль: решение прикладной задачи для конкретного полигона или региона.
- Партнерский модуль: участие научных

институтов, бизнеса, региональных органов власти.

Также будут реализованы следующие форматы обучения:

- сетевая магистратура между несколькими вузами и научными институтами;
- распределенные практики на разных типах полигонов: лесных, болотных, аграрных, урбанизированных;
- летние и зимние школы;
- проектные семестры;
- совместное руководство ВКР и магистерскими диссертациями со стороны вуза и оператора полигона.

7.4 ПРОГРАММЫ ДИСТАНЦИОННОГО ОБУЧЕНИЯ

Развитие образовательной деятельности полигонов должно позволить реализовывать гибкие дистанционные треки, которые расширяют охват и создают вход в полигонную тематику для широкого круга студентов и аспирантов в режиме дистанционного обучения:

1. Онлайн-ступень “Основы климатического и экосистемного мониторинга”
2. Онлайн-трек “ГИС, ДЗЗ и данные карбоновых полигонов”
3. Онлайн-программа “Экосистемные услуги, климатическая политика и территориальное управление”



4. Дистанционный курс “Обработка экологических данных и ИИ”
5. Гибридный формат “онлайн + очная полевая неделя”.

7.5 ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫЕ ТРЕКИ ДЛЯ ШКОЛЬНИКОВ

Это направление позволит сделать карбоновые полигоны базой ранней профориентации. Предполагаемые треки будут включать:

1. Школьный трек “Юный исследователь климата и экосистем”
2. Трек “Школьный экомониторинг”
3. Трек “Биоразнообразие вокруг нас”
4. Трек “Цифровая экология для старшеклассников”
5. Предуниверсарий на базе полигонов.

В условиях расширения задач карбоновых полигонов от мониторинга потоков парниковых газов к комплексным экосистемным

исследованиям целесообразно развивать новые образовательные программы бакалавриата и магистратуры, ориентированные на подготовку кадров в области экосистемного мониторинга, почвенно-биогеохимических исследований, гидроэкологии, биоразнообразия, устойчивого землепользования, геоинформационных технологий, анализа экологических данных и цифрового моделирования.

Такие программы должны реализовываться в сетевом формате с обязательной опорой на инфраструктуру полигонов как на площадки для практик, проектного обучения, исследовательской работы и апробации новых образовательных моделей. Дополнительно необходимо формировать линейку дистанционных курсов, программ дополнительного профессионального образования и школьных треков, обеспечивающих раннее вовлечение обучающихся в климатическую и экосистемную повестку.

08

МЕЖДУНАРОДНОЕ СОТРУДНИЧЕСТВО В РАМКАХ ПРОГРАММЫ “ЗЕРКАЛЬНЫХ” КАРБОНОВЫХ ПОЛИГОНОВ



В проекте карбоновых полигонов Российской Федерации в 2024 году начала реализовываться программа формирования «зеркальных» карбоновых полигонов как специализированного механизма международного научно-технологического сотрудничества. Сегодня зеркальные карбоновые полигоны уже созданы в республику Бразилии в Амазонии, Боснии и Герцеговине (Вучия Лука – Республика Сербская и Республике Сербия. Планируется создание зеркальных карбоновых полигонов с учеными Казахстана, Азербайджана и Южно-Африканской республики, где в 2025 году прошли успешные совместные испытания и сопоставление работы российских и южноафриканской измерительной аппаратуры.

Целевая функция инициирования создания зеркальных полигонов состоит во включении российских карбоновых полигонов в систему международного мониторинга потоков климатически активных газов и параметров углеродного цикла. Другими словами, данная инициатива помимо расширения научных контактов, имеет прикладные задачи обеспечения сопоставимости данных (как результатов точечных наблюдений, так и интегральных оценок), верификации методических подходов, расширения географии апробации российских методик и моделей, развития исследовательской инфраструктуры, продвижения отечественных технологий и разработок.

Отбор зарубежных площадок для включения в программу создания зеркальных полигонов должен осуществляться исходя из научной значимости, практической полезности для российских полигонов, уровня инфраструктурной готовности партнера и возможности работы по согласованным протоколам. Реализация программы «зеркальных» карбоновых полигонов должна обеспечивать решение следующих укрупненных групп задач.

1. Научные задачи включают организацию мониторинга потоков парниковых газов и углеродного баланса; проведение наземных и дистанционных наблюдений; анализ сопоставимости данных, унификация и взаимная верификация протоколов наблюдений, методик измерений, лабораторных процедур и расчетных подходов; тестирование применимости российских моделей оценки углеродного баланса в иных природно-климатических условиях; калибровка и валидация данных дистанционного зондирования Земли на основе совместных наземных измерений; формирование сопоставимых рядов данных по ключевым типам экосистем; снижение неопределенностей и повышение доказательности научных результатов.
2. Технологические задачи включают разработку, испытание и апробацию

технологий секвестрации углерода; апробацию технологий рекарбонизации и восстановления экосистем; демонстрацию и тестирование российских технологий мониторинга, приборов, сенсорных систем, программного обеспечения, аналитических сервисов и инженерных решений; проверку применимости технологических решений в различных природных условиях, в том числе для их последующего масштабирования и практического внедрения.

3. Задачи в сфере адаптации к последствиям изменения климата, оценки ущерба и рисков включают оценку климатических и экологических рисков; анализ ущерба от деградации экосистем и неблагоприятных климатических воздействий; оценку эффектов от природно-климатических мероприятий; эколого-экономическое моделирование; анализ эффективности мер адаптации; подготовка данных и моделей для поддержки принятия решений в области климатической политики, природно-климатических проектов и управления территориями.

“Зеркальные” полигоны могут создаваться на базе реально действующих в странах-партнерах мониторинговых площадок, а также аналогов карбоновых ферм, обеспечивающих полную реалистичность и полноту процессов, использующихся при генерации и продаже углеродных единиц. Особенно ценен опыт карбоновых ферм в странах с развитыми системами углеродного регулирования — он позволяет изучить передовые методологии и механизмы реализации климатических проектов, а также адаптировать российские подходы к международным стандартам.

Состав задач, реализуемых на конкретном зеркальном карбоновом полигоне, определяется типом экосистемы, исследовательским профилем, уровнем инфраструктурной готовности, наличием приборной и аналитической базы, доступностью сопоставимых данных и практическими целями сотрудничества с соответствующим зарубежным партнером.

Развитие карбоновых полигонов целесообразно увязывать с актуальными международными климатическими и природоохранными инициативами, включая Глобальную инициативу G20 по биоэкономике, а также новые механизмы ООН в сфере сохранения биоразнообразия. В этом контексте особое значение приобретают создание Фонда Кали и формирование

международных подходов к экономической оценке экосистемных услуг. Перспективным направлением является разработка и развитие системы учетных единиц, основанных на данных о биоразнообразии, включая биокредиты и биоофсеты, дополняющие рынок карбоновых кредитов. Участие в таких процессах позволит обеспечить сопоставимость российских подходов с международной практикой, расширить возможности привлечения партнеров и инвестиций, а также повысить научную и прикладную значимость карбоновых полигонов.

Наряду с основными блоками задач программа включает сопутствующие направления, к которым относятся образовательные программы, стажировки, полевые школы, обмен исследовательскими и инженерными командами, развитие приборной, лабораторной и аналитической базы, а также содействие международной публикационной и экспертной кооперации.

Оценка результативности реализации программы «зеркальных» карбоновых полигонов осуществляется на основе следующих ключевых показателей:

- количество зарубежных площадок, включенных в программу «зеркальных» карбоновых полигонов;
- количество унифицированных или взаимно признанных протоколов наблюдений, методик измерений, лабораторных процедур и расчетных подходов;
- количество российских моделей оценки углеродного баланса, прошедших тестирование на зарубежных партнерских площадках;
- количество российских технологических решений, прошедших демонстрацию, испытание либо опытную апробацию за рубежом;



- количество совместных публикаций, отчетов, методических документов и экспертных материалов, подготовленных по результатам реализации программы;
- количество специалистов, прошедших стажировки, программы обмена, полевые школы и иные формы подготовки кадров;
- количество российских приборов, программных продуктов и инженерных решений, подготовленных к масштабированию либо практическому внедрению на основе результатов международной апробации.

Реализация программы «зеркальных» карбоновых полигонов направлена на повышение достоверности результатов, получаемых на российских карбоновых полигонах, обеспечение международной сопоставимости данных, расширение практики верификации отечественных методик, моделей и технологических решений, а также на укрепление научно-методической базы Российской Федерации в сфере мониторинга углеродного цикла экосистем. Реализация программы должна способствовать развитию

экспортного потенциала российских приборов, программного обеспечения и инженерных и технологических решений в области снижения выбросов и повышения секвестрации климатически активных газов природными экосистемами, подготовке кадров и созданию организационных условий для осуществления совместных исследовательских, образовательных и пилотных климатических проектов.

“

Создание «зеркальных карбоновых полигонов помимо расширения научных контактов, имеет прикладные задачи обеспечения сопоставимости данных, верификации методических подходов, расширения географии апробации российских методик и моделей, развития исследовательской инфраструктуры, продвижения отечественных технологий и разработок.

ОЖИДАЕМЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ К 2028-2030 ГГ



КЛЮЧЕВЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ ЭФФЕКТИВНОСТИ

Технологические

Создание и верификация 10-12 типовых цифровых двойников экосистем; разработка 5-7 отраслевых калькуляторов углеродного следа; формирование 3-х геномных банков ключевых биомов для полигонов в различных ландшафтных условиях.

Количество адаптированных, утвержденных методологий (в т.ч. ПКП) признанных в реестре ГОСТ и на международном рынке.

Кадровые

Подготовка не менее 500 магистров по новым программам; повышение квалификации не менее 2000 специалистов из реального сектора экономики и госуправления.

Экономические

Запуск не менее 15 пилотных проектов по внедрению разработанных технологий секвестрации климатически активных газов совместно с компаниями-партнерами.

Научные

Публикация не менее 50 статей в Q1 журналах по новым направлениям исследований; получение не менее 40 патентов на технологии секвестрации и мониторинга, ремедиации деградированных экосистем и циркулярной биоэкономики.

Пилотная апробация методики Минсельхоза России по расчету углеродного следа сельскохозяйственной продукции на 3-5 агроландшафтных полигонах с формированием верифицированной базы коэффициентов выбросов.

Улучшение национальных коэффициентов для Национального кадастра

Конверсионные коэффициенты, рассчитываемые для выбросов и поглощения, являются ключевыми инструментами при подготовке Национального кадастра антропогенных выбросов парниковых газов из источников и их абсорбции поглотителями. Эти коэффициенты станут более достоверными, если они будут в том числе основываться на результатах измерений в различных условиях, что может быть обеспечено работами на карбоновых полигонах.

- **Разработка и апробация** методических и модельных подходов к пространственному масштабированию результатов локальных наблюдений, обеспечивающих переход от измерений, выполняемых на отдельных карбоновых полигонах, к региональным и национальным оценкам потоков климатически активных газов и состояния экосистем на основе интеграции наземных наблюдений, данных дистанционного зондирования и математического моделирования.
- **Формирование механизмов научно-технологической интеграции** карбоновых полигонов, включая развитие тематических и региональных кластеров, объединяющих площадки с близкими природно-климатическими условиями, общими исследовательскими задачами или взаимодополняющими компетенциями. Такая интеграция должна обеспечить более эффективное использование исследовательской инфраструктуры, координацию наблюдений и экспериментов, сопоставимость получаемых результатов и реализацию совместных научных и технологических проектов.
- **Разработка и апробация единых методических подходов к мониторингу и оценке роли пресноводных экосистем** в региональных и национальных балансах климатически активных газов, включая развитие методов измерений, отчетности и верификации (MRV) для различных типов внутренних водных объектов.
- **Развитие отечественной приборной и технологической базы для мониторинга климатически активных газов** и сопутствующих параметров водных экосистем, включая создание и апробацию измерительных комплексов для определения потоков газов на границе «вода-атмосфера» и их концентраций в водной среде.
- **Формирование сопоставимых массивов данных о состоянии почв и характеристиках почвенных микробных сообществ** в различных природно-климатических условиях и при использовании различных агротехнологий, интегрированных в Единую цифровую платформу проекта и используемых для оценки устойчивости, деградации и восстановления агроэкосистем.
- **Разработка и апробация на базе сети карбоновых полигонов подходов к комплексной оценке агротехнологий**, учитывающих их влияние на углеродный и другие биогеохимические циклы, состояние и устойчивость почв, водный режим, формирование стока, биоразнообразие и продуктивность агроэкосистем. Результаты таких исследований должны использоваться для научного обоснования и верификации почвозащитных, ресурсосберегающих и климатически ориентированных технологий сельскохозяйственного производства.

10

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленная Концепция развития сети карбоновых полигонов на 2026–2030 годы формирует новую модель дальнейшего развития проекта, основанную на переходе от преимущественно локальной системы наблюдений потоков парниковых газов к распределенной научно-технологической инфраструктуре, обеспечивающей получение, накопление, интеграцию и практическое использование данных о функционировании природных и антропогенно измененных экосистем.

За период реализации пилотного проекта создана значительная исследовательская и приборная инфраструктура, сформирована сеть полигонов в различных природно-климатических условиях, накоплен опыт проведения прямых измерений потоков климатически активных газов, применения дистанционных методов наблюдений, разработки природно-климатических проектов и подготовки специалистов. Следующий этап развития должен быть направлен не столько на простое количественное расширение существующей сети, сколько на повышение ее научной, технологической и практической результативности.

Ключевым направлением трансформации должна стать интеграция отдельных карбоновых полигонов в единую распределенную систему, основанную на сопоставимости наблюдений, стандартизации методических подходов, развитии систем контроля качества и формировании непрерывных рядов

наблюдений. Получение первичных данных должно рассматриваться не как конечная цель деятельности полигонов, а как первый элемент единой технологической цепочки, включающей хранение и систематизацию данных, их последующую гармонизацию, моделирование процессов, создание аналитических и информационных продуктов, разработку технологий и использование результатов при принятии научных, управленческих и хозяйственных решений.

Особое значение в этой системе приобретает создание Единой цифровой платформы проекта. Ее развитие должно обеспечить сохранение исходных результатов наблюдений и исследований, формирование единого пространства метаданных, повышение доступности и сопоставимости информации, а также создание условий для комплексного анализа и разработки производных научных и прикладных решений. При этом принципиально важным является сочетание открытости и повторного использования данных с сохранением научного приоритета, авторства и прав организаций, получивших первичные результаты. Цифровая инфраструктура должна стать не только системой хранения информации, но и инструментом формирования нового исследовательского и технологического контура, объединяющего полигоны, научные организации, университеты, органы управления и промышленных партнеров.

Развитие математического моделирования является необходимым условием перехода



от локальных измерений к региональным и национальным оценкам. Даже при существенном расширении сети прямые наблюдения не могут самостоятельно обеспечить пространственно непрерывное описание потоков климатически активных газов и динамики экосистем. Поэтому развитие процесс-ориентированных, пространственно распределенных, инверсионных и гибридных моделей должно быть тесно связано с наземными наблюдениями, дистанционным зондированием и современными методами обработки данных. Перспективным направлением является создание цифровых двойников типовых экосистем, позволяющих объединять наблюдения и модели в динамическую систему оценки текущего состояния экосистем и анализа возможных сценариев их изменения под воздействием климатических и антропогенных факторов.

Приоритетное значение для дальнейшего развития сети должны иметь экосистемы и территории, характеризующиеся высокой климатической чувствительностью, значительным вкладом в региональный и национальный баланс парниковых газов или недостаточной изученностью. К таким направлениям относятся бореальные леса, болотные и мерзлотные экосистемы, агроландшафты, аридные и семиаридные территории, внутренние водные системы и прибрежно-шельфовые зоны, а также территории, подверженные различным формам деградации земель. Одновременно дальнейшее развитие сети требует более четкого определения национальных научных приоритетов и концентрации ресурсов на ограниченном числе задач, по которым карбоновые полигоны способны обеспечить результаты, недостижимые в рамках отдельных разрозненных исследований.

Расширение функционала полигонов в сторону комплексных экосистемных исследований представляется обоснованным, поскольку углеродный баланс и потоки климатически активных газов невозможно в полной мере интерпретировать без учета состояния растительности, почв, гидрологического режима, биоразнообразия и антропогенного воздействия. Вместе с тем включение новых направлений исследований и технологий должно осуществляться на основе четких критериев их связи с основной миссией проекта. Расширение тематики не должно приводить к размыванию понятия карбонового полигона и распылению ограниченных ресурсов между

большим количеством недостаточно связанных направлений.

Важным направлением дальнейшего развития является участие карбоновых полигонов в информационном и научно-методическом обеспечении региональных планов адаптации к изменениям климата. Накопленные и формируемые на полигонах данные могут использоваться для оценки климатических рисков, состояния и устойчивости экосистем, изменений гидрологического и температурного режимов, деградации земель и трансформации природных систем. Развитие специализированных площадок для изучения деградации земель позволит обеспечить долгосрочную оценку пространственной и временной динамики деградационных процессов, связанных с ними изменений углеродного, водного и энергетического баланса экосистем, а также научное сопровождение мер по восстановлению нарушенных территорий и устойчивому управлению земельными ресурсами. При этом необходимо четко разграничивать задачи адаптации к последствиям изменения климата и задачи смягчения климатических изменений, одновременно учитывая возможные синергетические эффекты природоориентированных решений.

Дальнейшее развитие сети невозможно без формирования устойчивой системы подготовки кадров. Образовательная функция карбоновых полигонов должна быть тесно связана с их научной и технологической деятельностью. Сетевые образовательные программы, полевые практики, лабораторные исследования, работа с цифровыми данными и участие в прикладных проектах могут обеспечить подготовку специалистов нового типа, обладающих компетенциями одновременно в области климатологии, экологии, биогеохимии, гидрологии, дистанционного зондирования, моделирования, информационных технологий и управления природными ресурсами.

Международное сотрудничество, включая развитие программы «зеркальных» карбоновых полигонов, следует рассматривать как механизм повышения международной сопоставимости данных, проверки российских методик и моделей в различных природно-климатических условиях, апробации отечественных технологий и расширения научно-технологической кооперации. Международное направление должно быть непосредственно связано с ключевыми научными и технологическими

приоритетами российской сети и ориентировано на получение результатов, усиливающих национальную систему климатического мониторинга.

Таким образом, реализация Концепции может обеспечить формирование к 2030 году качественно новой системы карбоновых полигонов — не совокупности отдельных станций наблюдений, а единой распределенной инфраструктуры, объединяющей долгосрочный мониторинг, фундаментальные исследования, цифровые технологии, математическое моделирование, разработку и апробацию природоориентированных и низкоуглеродных решений, подготовку кадров и информационное обеспечение климатической политики.

Вместе с тем для успешной реализации Концепции необходимо усилить ее стратегическую и управленческую структуру. В окончательной редакции целесообразно более четко определить главную миссию проекта,

установить иерархию стратегических целей и задач, ранжировать научные и технологические приоритеты, разграничить базовый мониторинг, исследовательские и технологические функции полигонов, определить этапы реализации на весь период 2026–2030 годов и сформировать согласованную систему количественных и качественных показателей эффективности.

При соблюдении этих условий развитие сети карбоновых полигонов может стать одним из ключевых элементов национальной инфраструктуры исследования климатической системы и природных экосистем, обеспечивающим переход от фрагментарных наблюдений к научно обоснованным региональным и национальным оценкам, а также к разработке практических решений в области устойчивого природопользования, восстановления и предотвращения деградации земель, адаптации к изменениям климата и низкоуглеродного развития.



Карбоновые полигоны
Российской Федерации