

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени М.В. ЛОМОНОСОВА
ФАКУЛЬТЕТ ПОЧВОВЕДЕНИЯ

На правах рукописи

Добровольская Валерия Андреевна

**Оценка потенциала секвестрации углерода пахотными почвами ряда
областей Европейской территории России**

4.1.3. Агрохимия, агропочвоведение, защита и карантин растений

ДИССЕРТАЦИЯ
на соискание ученой степени
кандидата биологических наук

Научный руководитель:

кандидат сельскохозяйственных наук, доцент

Мешалкина Юлия Львовна

Москва – 2025

ОГЛАВЛЕНИЕ

ОГЛАВЛЕНИЕ.....	2
ВВЕДЕНИЕ.....	5
ГЛАВА 1. ПОВЫШЕНИЕ ПОЧВЕННОГО ПЛОДОРОДИЯ КАК СПОСОБ СМЯГЧЕНИЯ ПОСЛЕДСТВИЙ ГЛОБАЛЬНЫХ КЛИМАТИЧЕСКИХ ИЗМЕНЕНИЙ (СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ПРОБЛЕМЫ)	14
1.1 Основные документы, описывающие последствия изменения климата и инициатива «4 промилле».....	14
1.2 Секвестрация углерода как один из инструментов митигации изменений климата и адаптации к ним	17
1.3 Стратегии «углеродной» экономики.....	22
1.4 Сохранение почвенного углерода как метод управления почвенным плодородием.....	26
1.4.1 Факторы, влияющие на выбросы парниковых газов в сельском хозяйстве	26
1.4.2 Анализ терминологии в области ресурсосберегающего земледелия	28
1.4.3 Меры, направленные на сохранение почвенного углерода	31
1.5 Глобальная карта секвестрации почвенного углерода (GSOCseq)	37
1.6 Почвенный углерод в теории углеродного цикла	39
1.7 Моделирование прогноза изменений запасов органического вещества как главного показателя почвенного плодородия	50
ГЛАВА 2. ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ	58
2.1 Объекты исследования	58
2.1.1 Зональный ряд пахотных почв	58
2.1.2 Московская область	61
2.1.3 Ростовская область	62
2.2 Алгоритм формирования карт потенциала секвестрации почвенного углерода GSOCseq согласно методике ФАО ООН	65
2.2.1 Общие принципы создания карт секвестрации.....	65
2.2.2 Гармонизация входных данных и алгоритм моделирования	66

2.2.3 Источники входных данных.....	69
2.2.4 Путь вовлечения в модель данных о поступлении органического вещества.....	72
2.2.5 Расчет доли неопределенности картографического исследования в результатах ...	75
2.3 Методика расчета чистой первичной продукции по данным Росстата на локальном уровне.....	75
2.4 Принципы расчетов целевых значений 2 и 4 промилле.....	82
2.5 Расчет вариабельности запасов гумуса на примере полевых данных карбонового полигона Чашниково Московской области.....	82
ГЛАВА 3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ	84
3.1 Сравнительные скорости секвестрации углерода ряда областей Европейской территории России.....	84
3.1.1 Абсолютные скорости секвестрации для различных сценариев землепользования.....	84
3.1.2 Возможность достижения глобальной цели «4 на 1000» и ее национальной альтернативы.....	90
3.1.3 Неопределенность расчетов и ее составляющие на примере Московской области	92
3.2 ОЦЕНКА ЧИСТОЙ ПЕРВИЧНОЙ ПРОДУКЦИИ НА ОСНОВЕ СТАТИСТИЧЕСКИХ ДАННЫХ.....	95
3.2.1 Чистая первичная продукция на основе локальных статистических данных для Московской области	95
3.2.2 Чистая первичная продукция на основе локальных статистических данных для Ростовской области.....	100
3.2.3 Обсуждение результатов, полученных по чистой первичной продукции	106
3.3 Оценка скорости секвестрации углерода на основе статистических данных	110
3.3.1 Оценка скорости секвестрации углерода для Московской области	110
3.3.2 Оценка скорости секвестрации углерода для Ростовской области	116

3.3.3 Обсуждение результатов, полученных по скоростям секвестрации	
121	
3.3.4 Возможность достижения национальной цели «2 на 1000» для	
Московской и Ростовской областей	125
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	129
ВЫВОДЫ	130
СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ	132
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	133
ПРИЛОЖЕНИЯ	153

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность. В 2023 г. была принята Методология реализации климатических проектов по изменению запасов органического углерода в почве на пахотных землях. В ней задокументировано, что определение запасов почвенного органического углерода (т С/га) на глубине 0 – 30 см производится методом моделирования на 20-летний период с использованием динамических моделей почвенного углерода (Изменение запасов..., 2023). Этот подход апробирован в ходе участия Российской Федерации в проекте Глобального почвенного партнерства ФАО ООН по созданию Глобальной карты секвестрации почвенного углерода (The Global Soil Organic Carbon Sequestration Potential Map, GSOCseq).

Одним из методов снижения концентрации парниковых газов в атмосфере является секвестрация углерода почвами, которая представляет собой захват углекислого газа путем фотосинтеза и дальнейшую трансформацию растительных остатков в почвенный органический углерод, в той или иной степени защищенный от разложения. Мировые запасы почвенного органического углерода в метровом слое составляют 1550 Гт С, из них в России локализовано около 298 Гт С, из них в почвах сельхозугодий - 28 Гт С (Столбовой, 2020; Batjes, 1996; Stolbovoy, 2002a; Stolbovoy et al., 2002b). При этом слой почвы 0-30 см содержит 45% от органического углерода в 2-метровом слое (Столбовой, 2020).

Оценка потенциала секвестрации углерода почвами России, исходя из различных внешних факторов, становится особенно актуальной в силу пестроты и разнообразия ее почвенного покрова. Потери почвенного органического углерода пашни составляют 2,6 Гт С из слоя 0-30 см (Stolbovoy, 2002a). Применение углерод сберегающих технологий в области сельского хозяйства может снизить концентрацию углекислого газа в атмосфере на 50-100 Гт С на горизонте около столетия (Hansen et al., 2008). В исследованиях, проведенных на различных пахотных почвах мира, было показано, что скорости поглощения органического углерода почвой могут достигать от 0,2 до 0,5 т С/га в год (Чернова и др., 2021).

Почвенная секвестрация углерода является важным направлением с точки зрения сбережения почвенного плодородия, так как меры сохранения углерода

направлены, главным образом, на долгосрочное повышение запасов органического вещества почвы и не требуют изменения структуры землепользования, к примеру, залесения сельхозземель, что актуально при конкуренции за земельные ресурсы. Увеличение запасов углерода также обеспечивает дополнительные преимущества, поскольку изменяет целый ряд почвенных процессов, связанных с трансформацией органического вещества – ведущего макропроцесса в почве по количеству перерабатываемого вещества и выделяемой энергии, что обуславливает сохранение и рост почвенного плодородия и биологической продуктивности почв. В условиях антропогенного изменения климата, характеризующегося увеличением частоты и интенсивности экстремальных погодных явлений, управление производственным процессом агроценозов приобретает ключевое значение как стратегический элемент адаптационной стратегии.

Несмотря на очевидные практические преимущества от преумножения разработок в области изучения секвестрации углерода почвами, существует большой перечень нерешенных вопросов, связанных с единообразием критериев оценки темпов секвестрации, с соотношением скорости секвестрации и регистрацией последовавших положительных изменений запасов углерода в почве, с экономическим эффектом применяемых мер. Ввиду двуединой результативности стратегии секвестрации углерода почвами не определен приоритет между климатическими и продовольственными целями для формирования рекомендаций (Семёнов, Когут, Иванов, 2025).

Степень разработанности темы исследования. Интерес почвоведов к динамике органического вещества существует давно, и его изучение дало обширную теоретическую и практическую базу (Кононова, 1963; Дергачева, 1984; Орлов, Лозановская, Попов, 1985; Вилкова и др., 1998; Заварзин, Кудеяров, 2006; Котлярова, 2015; Jenkinson, 1990; Sollins et al., 1996; Schulter et al., 2000; Wander et al., 2004; Wu et al., 2005; Albers et al., 2008; Von Lützow et al., 2008; Guttières et al., 2021). Это позволило использовать имеющиеся знания в приложении к отдельно развивающемуся направлению смягчения изменений климата и адаптации к ним (Когут и др., 2020; Six et al., 2002; Stolbovoy, 2002a; Stolbovoy et al., 2002b;

Kondratyev et al., 2003; Canqui et al., 2009; Zhang et al., 2017; Blanco- Paustian et al., 2019a).

Применение в почвоведении методов математического моделирования (Шеин и др., 2016; Розенберг, 2017; Семёнов, Ташкин, 2022а) и цифровой картографии (Иванов и др., 2012; Докучаев и др., 2017; Савин, Жоголев, Прудникова, 2019; Голозубов, Колесникова, Чернова, 2021; Алябина, Голозубов, Чернова, 2022) стало широко распространенным. В последние десятилетия в следствие глобализации быстрыми темпами развивается их применение в области оценки и прогноза запасов почвенного органического вещества (Смагин и др., 2001; Кондратьев, Крапивин, 2004; Комаров и др., 2007; Тарко, 2010; Рыжова, 2011; Бурков, Крапивин, Шалаев, 2012; Чертов и др., 2013; Сафонова, Соколова, 2017; Чернова и др., 2021; Рыжова, Романенков, Степаненко, 2024; Jenkinson et al., 1977; Bjorkstrom, 1979; Coleman et al., 1996; Lutzow et al., 2008; Harris et al., 2012; Von Campbell et al., 2015).

Существуют исследования, имеющие целью увеличить уровень подробности и точности подобных прогнозов (Когут и др., 2020; Голозубов, Чернова, 2022; Романенков и др., 2022; Добровольская, Шабалина, Мешалкина, 2023а; Добровольская, Шабалина, 2023в; Smith et al., 2005; Lal et al., 2018; Paustian et al., 2019b; Romanenkov et al., 2019).

Цель и задачи темы исследования. Цель работы – оценить потенциал секвестрации углерода в слое 0–30 см пахотных почв для ряда областей России путем прогнозного моделирования динамики почвенного органического углерода на основе входных данных различной подробности.

Для достижения цели были поставлены следующие задачи:

1. Дать прогноз скоростей секвестрации углерода пахотными почвами ряда областей Европейской территории России по стандартной методике ФАО ООН на основе глобальных баз данных.
2. Разработать методику расчета чистой первичной продукции на основе локальных данных урожайности и посевных площадей базы данных Росстата.

3. Дать прогноз уровня чистой первичной продукции для Московской и Ростовской областей на основе локальных данных и сравнить их с результатами, полученными с использованием глобальных баз данных.

4. Дать прогноз скоростей секвестрации углерода пахотными почвами Московской и Ростовской областей на основе локальных данных и сравнить их с результатами, полученными с использованием глобальных баз данных.

5. Оценить неопределенность картографических расчетов и прогнозов, а также вклад пробоотбора в случае перехода на использование полевых данных.

6. Оценить достижимость международной цели «4 промилле» и её национальной альтернативы «2 промилле» при применении методики расчета запасов почвенного углерода, предложенной ФАО, а также при применении данных Росстата – для Московской и Ростовской областей.

Объект и предмет исследования. Объектом исследования были пахотные почвы Европейской территории России, а предметом исследования - потенциал секвестрации углерода этих почв.

Научная новизна. Разработана и апробирована методика расчета чистой первичной продукции (NPP) на основе национальной статистической информации по показателям «Посевные площади сельскохозяйственных культур» и «Урожайность сельскохозяйственных культур (в расчете на убранную площадь)». Впервые для прогноза скоростей секвестрации пахотных почв Российской Федерации и параметров почвенного плодородия использованы локальные статистические данные об урожайности и посевных площадях основных сельскохозяйственных культур, которые позволяют делать выводы о целесообразности применения мер по сохранению углерода на пашне на уровне муниципальных образований. С использованием новой методики рассчитаны прогнозные скорости секвестрации углерода пахотными почвами Московской и Ростовской областей, а также впервые оценена достижимость целей «4 на 1000» и «2 на 1000» для всех рассматриваемых областей.

Теоретическая и практическая значимость работы. Полученные результаты могут быть использованы при формировании подробной базы данных

об уровнях чистой первичной продукции на территории пахотных почв. На их основе могут рассчитываться запасы почвенного органического вещества как в локальном, так и национальном масштабе.

Знания, полученные в данном исследовании, могут быть полезными при формировании уточненной национальной отчетности в области выбросов парниковых газов, регулярное предоставление которой взяла на себя Российская Федерация. Кроме того, полученные выводы о потенциале секвестрации углерода пахотными почвами должны служить основой для адресного подхода региональных органов власти к реализации приоритетных стратегий и программ развития сельского хозяйства.

Благодаря представленным исследованиям появилась возможность использования NPP как актуального регионального показателя продуктивности агроэкосистем, рассчитанного на фактических статистических данных. Наряду с показателем скорости секвестрации размер чистой первичной продукции можно использовать для региональной аналитики и выработки административных решений в области агроэкологических задач повышения и сохранения гумусированности почв и сокращения эмиссии углекислого газа в атмосферу. С целью обеспечения продовольственной безопасности территориальное развитие субъектов РФ должно осуществляться с учетом прогнозов изменения климата и окружающей среды, а также содержать рекомендации по сохранению почвенного плодородия (Хомяков и др., 2023). Управление продуктивностью агроценозов является неотъемлемой и прикладной составляющей природных климатических решений в агросекторе.

Предложенные инструменты изучения плодородия почв в агроэкосистемах могут быть использованы при разработке адаптивно-ландшафтных систем земледелия.

Методические материалы вошли в учебно-методический комплекс (УМК) «Секвестрация углерода пахотными почвами», разработанный в рамках учебного плана аспирантуры.

Методология диссертационного исследования. В основе

диссертационного исследования лежит комплексный подход, в котором процесс секвестрации рассматривается как звено глобального углеродного цикла. Моделирование динамики органического вещества разделяется на оценку ряда последовательных и параллельных процессов, взаимосвязанных и взаимозависимых. Исследование обращается к динамической процесс-ориентированной модели RothC, которая рекомендована ФАО как основной инструмент оценки секвестрации углерода почвами. Стратегия исследования основана на рекомендациях предпочтения локальных данных перед глобальными.

Положения, выносимые на защиту.

1. Использование локализованных данных продуктивности выявляет пространственную дифференциацию скоростей секвестрации углерода на уровне муниципальных образований, которая не обнаруживается при использовании глобальных данных ФАО и приводит к значительному пересмотру прогнозных оценок секвестрации углерода в сторону ее увеличения для Московской и Ростовской областей.

2. Достижение глобальной цели «4 промилле» и национальной альтернативы «2 промилле» для Московской области возможно при любом рассмотренном сценарии. Для Ростовской области возможно достичь лишь цели в 2 промилле при сценарии интенсивных углеродсберегающих технологий.

3. Наиболее активная секвестрация углерода наблюдается на территориях с преобладанием серых лесных почв лиственных лесов, а также оподзоленных, выщелоченных и типичных черноземов и серых лесных почв лесостепи.

4. Разработанная и апробированная методика расчета чистой первичной продукции (NPP) на основе данных Росстата почв обеспечивает переход к локально уточненным оценкам секвестрации углерода.

Степень достоверности и апробация результатов исследования. Все полученные экспериментальные результаты являются оригинальными, воспроизводимыми, их достоверность определяется достаточным объемом исследований, обработкой общепринятыми статистическими методами.

Достоверность результатов основана на репрезентативности выборки, применении методов статистического анализа и моделирования, оценки точности моделей. Степень достоверности подтверждается публикациями в рецензируемых научных журналах.

Результаты работы и основные положения были представлены на 16 конференциях: Всероссийская научная конференция с международным участием, посвященная 120-летию со дня рождения члена-корреспондента АН СССР В.А. Ковды «Почва как компонент биосфера: актуальные проблемы в условиях изменений климата», Пущино, 25-28 ноября 2024 г.; VIII конференция молодых ученых «Почвоведение: Горизонты будущего», Москва, 16-20 сентября 2024 г.; IX Всероссийский съезд общества почвоведов имени В.В. Докучаева, Казань, 12-16 августа 2024 г.; International Symposium on Sustainable Utilization of Black Soils, Чанчунь, Китай, 9-11 июля 2024 г.; II Международная научная конференция «Фундаментальные концепции физики почв: развитие, современные приложения и перспективы», факультет почвоведения МГУ, 25-31 мая 2024 г.; Международная научная конференция II Никитинские чтения «Актуальные проблемы почвоведения, агрохимии и экологии в природных и антропогенных ландшафтах», Пермь, 14-17 ноября 2023 г.; 3RD International Conference on Research of Agricultural and Food Technologies (I-CRAFT-2023), Adana, Turkiye, 4-6 октября 2023 г.; VII конференция молодых ученых «Почвоведение: Горизонты будущего. 2023», Москва, 18-22 сентября 2023 г.; Всероссийская научная конференция «Агрохимическая наука – синтез академических знаний и практического опыта», Москва, 12-13 сентября 2023; Международная научная конференция молодых учёных и специалистов, посвящённая 180-летию со дня рождения К.А. Тимирязева, Москва, 5-7 июня 2023 г.; Научный семинар «Углеродная нейтральность и экосистемные услуги органического вещества почв: методология и вызовы», Санкт-Петербург, 24-25 апреля 2023 г.; XXX Международная научная конференция студентов, аспирантов и молодых учёных «Ломоносов-2023», Москва, 10-21 апреля 2023 г.; VI Международная научно-практическая конференция «Здоровые почвы – гарант устойчивого развития», Курск, 30-31 марта

2023 г.; Всероссийская конференция с международным участием «Современная геоэкология и вызовы климатических изменений к 90-летию заслуженного профессора МГУ С.П. Горшкова (1932 - 2018), Москва, 17-18 ноября 2022 г.; VI конференция молодых ученых «Почвоведение: Горизонты будущего» Москва, Россия, 24 - 29 октября 2022 г.; Международная научная конференция XXV Докучаевские молодежные чтения «Почва – жизнь», Санкт-Петербург, 1-3 марта 2022 г.

Публикации. По результатам работы опубликовано 6 статей: из них 3 статьи в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных для защиты в диссертационном совете МГУ имени М.В. Ломоносова. Зарегистрирована база данных «Картографическая база данных потенциала секвестрации почвенного органического углерода в пахотных почвах Ростовской области на основе локальных данных о поступлении органических остатков в почву» (свидетельство № 2024624319 от 14.10.2024 г.)

Структура и объем работы. Диссертационная работа общим объемом 163 страницы состоит из введения, 3-х глав (обзора литературы, материалов и методов исследования, результатов и их обсуждения), заключения, выводов, списка сокращений, списка литературы из 158 источников (в том числе 60 на иностранном языке), 8 приложений, 14 таблиц и 51 рисунка.

Личный вклад автора. В основных опубликованных работах вклад автора является определяющим. Участие автора заключается в подборе и анализе литературы по теме исследования, в разработке методики исследования, в участии в полевых экспедициях, проведении пробоподготовки и части лабораторных работ, работе с цифровыми почвенными данными, проведении статистического анализа данных, построении пространственных моделей и оценке их точности. Автором самостоятельно проведено обобщение и интерпретация полученных результатов, представление их на конференциях. Автор принимала значительное участие в разработке методики по расчету чистой первичной продукции на основе статистических данных. Диссидентом был проведен анализ карт,

построенных в рамках проекта GSOCseq, на уровне 10 субъектов РФ, а также по природным зонам и подзонам, охватывающих данную территорию.

При этом необходимо отметить следующее. Инструкции по подбору и адаптации ряда входных данных для моделирования по методике ФАО, а также алгоритм работы на платформе Google Earth Engine получены А.Ю. Горбачёвой. Оценка неопределенности была выполнена под руководством В.П. Самсоновой, лабораторная часть - под руководством О.И. Филипповой. Интерпретация результатов по скоростям секвестрации, полученным по методике ФАО, выполнены совместно с В.А. Романенковым.

Автором была проведена значительная работа над текстом статей, докладов и презентаций.

Благодарности. Автор выражает глубокую признательность научному руководителю к.б.н. Ю.Л. Мешалкиной за помощь и поддержку при выполнении диссертационной работы, сотрудникам кафедры общего земледелия и агроэкологии за возможность проведения работы и ценные советы, полученные в ходе обсуждения работы на разных ее этапах, д.б.н., доценту В.П. Самсоновой за помощь, оказанную на разных этапах работы. Автор выражает отдельную благодарность д.б.н., профессору кафедры агрохимии В.А. Романенкову за указание генеральной линии, взвешенную критику, экспертизу идей и инициатив, А.Ю. Горбачевой за постоянную поддержку и содействие.

Исследование выполнено в рамках реализации важнейшего инновационного проекта государственного значения «Разработка системы наземного и дистанционного мониторинга пулов углерода и потоков парниковых газов на территории Российской Федерации, обеспечение создания системы учета данных о потоках климатически активных веществ и бюджете углерода в лесах и других наземных экологических системах» (рег. № 123030300031-6). Лабораторные анализы, а также оценка секвестрации ряда областей по методике ФАО были реализованы при поддержке Фонда имени Геннадия Комиссарова.

ГЛАВА 1. ПОВЫШЕНИЕ ПОЧВЕННОГО ПЛОДОРОДИЯ КАК СПОСОБ СМЯГЧЕНИЯ ПОСЛЕДСТВИЙ ГЛОБАЛЬНЫХ КЛИМАТИЧЕСКИХ ИЗМЕНЕНИЙ (СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ПРОБЛЕМЫ)

1.1 Основные документы, описывающие последствия изменения климата и инициатива «4 промилле»

Обобщение знаний об изменении климата происходит каждые 5-6 лет Международной группой экспертов по изменению климата (МГЭИК). Последний – шестой – оценочный доклад опубликован в 2021 г. (Шестой оценочный доклад МГЭИК, 2021). На его основе Росгидромет в 2022 г. подготовил Третий оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации (Третий оценочный доклад ..., 2022). Указанные документы являются свидетельством научного консенсуса относительно ряда утверждений. Во-первых, признается факт свершения широкомасштабных и быстрых изменений в атмосфере, океане, криосфере и биосфере. Во-вторых, масштабы недавних изменений в климатической системе расцениваются как беспрецедентные «на протяжении периодов от многих столетий до многих тысячелетий». Среди подобных изменений можно назвать рост приземной температуры воздуха и температуры в толще тропосферы, выхолаживание мезосферы, рост уровня Мирового океана и его теплосодержания (Cheng et al., 2020), сокращение площади ледников и морских льдов. Средняя глобальная температура приземного воздуха, по последним данным, составила примерно $14,9^{\circ}\text{C}$, это на $1,2^{\circ}\text{C}$ выше, чем в доиндустриальную эпоху (Третий оценочный доклад ..., 2022). Парижским соглашением об изменении климата 2015 г. была поставлена цель не допустить глобальное потепление более чем на $1,5^{\circ}\text{C}$, в крайнем случае на 2°C , относительно доиндустриального периода (Парижское соглашение ..., 2015).

Шестой оценочный доклад МГЭИК также закрепил тезис о том, что разогрев окружающей среды стал следствием деятельности человека (Шестой оценочный доклад МГЭИК, 2021). Это считается третьим основным утверждением, признанным международным научным сообществом, а соответствующая теория носит название «теория антропогенного усиления парникового эффекта».

Исключение из глобальных климатических моделей вклада антропогенного фактора ухудшает качество моделирования климата последних лет (Третий оценочный доклад ..., 2022).

Помимо аналитики текущего состояния климатической системы, традиционно МГЭИК дает прогнозы ее составляющих. В их число входит прогноз изменения глобальной температуры приземного воздуха согласно нескольким сценариям (рис.1.1). В последнем оценочном докладе этот показатель был рассчитан согласно новому сценарному подходу SSP (shared socio-economic pathways – общие социально-экономические пути развития). Последний индекс в маркировке сценария указывает на радиационное воздействие в 2100 г. (Семёнов, Гладильщикова, 2022б).

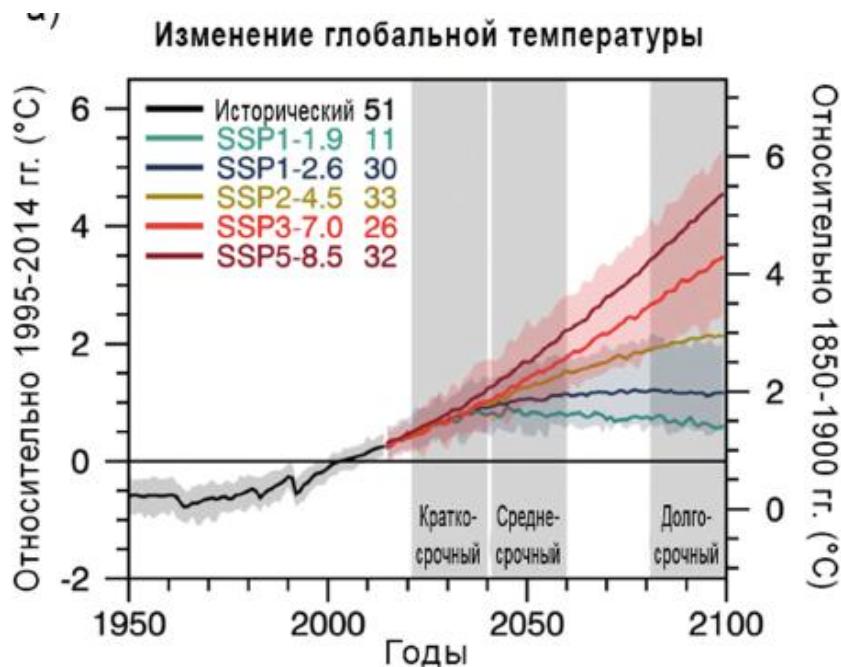


Рисунок 1.1 - Прогноз изменения глобальной температуры приземного воздуха согласно сценариям SSP (Третий оценочный доклад ..., 2022)

Указанный прогноз показал, что превышение пороговых значений температуры ($1,5^{\circ}\text{C}$ относительно доиндустриального периода 1850-1900 гг.) произойдет при реализации сценариев SSP2-4.5, SSP3-7.0 и SSP5-8.5 в среднем около 2030 г. Глобальная приземная температура будет продолжать повышаться, по крайней мере, до середины века (Третий оценочный доклад ..., 2022). При увеличении выбросов CO_2 поглотители углерода в океане и на суше будут хуже

справляться с компенсацией этих выбросов. Другим важным следствием эффекта глобальных изменений климата считается усиление климатической изменчивости. Количество опасных явлений в России за последние двадцать лет увеличилось втрое (Мохов, 2022). Это примерно в два с половиной раза быстрее глобальной скорости, а в ряде регионов – в четыре раза.

Характер изменения климата в России может по-разному сказываться на балансе почвенного углерода: растущая частота опасных природных явлений вызывает интенсивные процессы деградации почв, потепление может способствовать более интенсивной минерализации органического вещества, а увеличение осадков обусловливать его накопление. По оценке Росгидромета, в целом тенденция климатических изменений будет направлена на положительный баланс углерода в почве (Третий оценочный доклад ..., 2022). Что касается влияния изменения климата на сельскохозяйственный сектор экономики, то здесь преобладающими процессами станут аридизация климата земледельческой зоны и увеличение количества весенних осадков (Третий оценочный доклад ..., 2022). Баланс углерода в масштабах одного-нескольких лет будет зависеть от количества осадков. В засушливые годы он будет положительным и приводить к снижению минерализации органического вещества, а в более влажные годы ожидается отрицательный баланс за счет интенсификации минерализации. В целом, климатическим рискам будут более подвержены южные районы, которые являются основными производителями зерна.

Формулировки о поддержке устойчивых форм сельского хозяйства появились в Киотском протоколе на 3-й Конференции сторон РКИК в 1997 г. (ратифицирован Россией в 2004 г.). На основе оценки уровня накоплений углерода в 1990 г. планировалось осуществить прогноз накопления углерода в последующие годы. Вследствие неэффективности Киотского протокола в 2015 г. было принято Парижское соглашение по климату.

На Парижской конференции был представлен Лимско-Парижский план (Lima-Paris Action Agenda, LPAA), в рамках которого предложена инициатива «4 на 1000» – «Почвы для продовольственной безопасности и климата». Ежегодная

эмиссия углерода за счет сжигаемого топлива и обезлесения составляет 9,8 Гт С, из которых 4,3 Гт С не компенсируется поглощением растениями и океаном. Предполагалось, что если увеличивать запасы почвенного углерода на этот нескомпенсированный объем, то человечество сможет добиться целей углеродной нейтральности антропогенной деятельности. Так как мировые запасы углерода верхнего слоя почв оцениваются около 860 Гт С, то целевым уровнем ежегодной секвестрации объявлены 4 промилле от этой величины (Minasny et al., 2017).

Отечественные исследователи предложили трансформировать эту цель в национальную цель: «2 на 1000», исходя из запасов углерода в 2-метровом слое почв России (373 Гт С) и совокупного годового выброса в нашей стране (0,681 Гт С) (Иванов, Столбовой, 2019, Столбовой, 2020). Авторы выражают мнение, что именно переход на регенеративные технологии сельскохозяйственного производства являются ближайшей задачей реализации инициативы «4 на 1000».

Таким образом, особое место почв в смягчении последствий изменений климата и адаптации к ним получило признание научного сообщества и закреплено рядом международных документов. Однако цель – 4 промилле – нуждается в проверке в России на национальном уровне.

1.2 Секвестрация углерода как один из инструментов митигации изменений климата и адаптации к ним

Управление почвенным органическим углеродом является уникальной стратегией, одновременно обеспечивающей снижение концентрации CO₂ в атмосфере (митигацию) и устойчивость агрокосистем к климатическим стрессам (адаптацию) через повышение содержания почвенного органического углерода, улучшение характеристик влагоемкости, структуры и микробиома почвы. Решение задач митигации и адаптации лежит в глубоком понимании биогеохимических круговоротов, в частности, круговорота углерода (Кондратьев, Крапивин, 2004).

Исторически становление понятия «углеродный цикл» можно разделить на три периода (Galvez et al., 2012). Первый период был связан с открытием взаимокомпенсации двух процессов: фотосинтеза и дыхания. Благодаря работам А.Л. Лавуазье (основателя современной химии) стало известно, что из себя

представляет углекислый газ, а также появился термин «углекислота» вместо существовавшего «fixed air» (Galvez et al., 2012).

Второй период начался с того, что наряду с физиологическими процессами специалисты стали рассматривать происходящее в атмосфере. Благодаря работе Адольфа Броньяра (Brongniart, 1828) захоронения углеродистого материала (carbon material – СМ) в отложениях после отмирания фитомассы стали считаться крупнейшим приемником углекислоты. В рамках этого этапа процесс, называемый сейчас «секвестрацией углерода почвами», нашел свое место в списке потоков углерода. Были признаны разнонаправленные геологические процессы, влияющие на состав атмосферы. Ж.Б. Буссенго в 1834 г. предположил вулканические процессы одним из источников углекислого газа в атмосфере (Boussingault, 1834). Обмен углеродом между атмосферой и отложениями обосновывался процессами преобразования силикатов и окисления углеродистого материала. В ряде работ французского химика Жак-Жозефа Эбельмана (Ebelmen, 1845, 1847, 1848) было показано, что для химического выветривания силикатов требуется углекислый газ атмосферы.

Третий этап изучения углеродного цикла выделяется тем, что отложения уже разделялись на поверхностные и глубинные. Термин «углеродный цикл» был предложен Вернадским в его труде «La Geochimie» в 1924 г. (Vernadsky, 1924), где ученый описал основные процессы трансформации углерода в биосфере, океане, формирование карбонатов и каменного угля, вклад вулканических процессов. Окончательный переход научного сообщества к теории углеродного цикла был сделан благодаря установлению закономерностей тектоники плит, которая объясняла механизмы обмена материей между отложениями различной глубины залегания. Это произошло в 20 веке. Новейшим открытием в рамках изучения углеродного цикла стало открытие процесса декарбонизации вследствие субдукции (поддвигания одной океанической литосферной плиты под другую).

Цикл углерода представляет собой набор резервуаров (пулов) этого элемента и потоков обращения между ними и неразрывно связан с потоками углекислого газа. В рамках глобальной модели биогеохимического цикла углекислого газа

(Model of Global CO₂ Cycle – MGCDC) (Kondratyev et al., 2006) резервуары можно разделить на атмосферу, Мировой океан, биосферу и литосферу. Среди главных наземных резервуаров углерода можно назвать леса (38-39% всего запаса), травяные экосистемы (38%) и агроэкосистемы (26-28%) (Кондратьев, Крапивин, 2004). Запасы углерода гумуса почв оцениваются в 1500-3000 Гт С. Природный баланс углекислого газа – то есть баланс его потоков между пулами – оценивается в 150 Гт С (Кондратьев, Крапивин, 2004). Потоки делятся по причине возникновения на природные или антропогенные, причем, их интенсивности взаимозависимы. В наземных экосистемах обмен углеродом происходит между атмосферой, мертвым и живым органическим веществом. По наиболее цитируемым оценкам отечественных авторов, растениями из атмосферы поглощается порядка 120 Гт С/год, из которых около половины возвращается за счет дыхания. При этом разложение мертвого органического вещества выделяет в атмосферу около 10 Гт С/год. Авторы признают, что подобные глобальные оценки не могут быть локализованы из-за чрезвычайной пестроты региональных условий (Кондратьев, Крапивин, 2004).

Вопрос вклада антропогенных источников в цикл углекислого газа давно является дискуссионным и порождает скептические точки зрения на вопрос роли человека в глобальных климатических изменениях. Считается, что основные причины связаны с урбанизацией, деформацией структуры почвенно-растительных сообществ, загрязнением гидросфера (Кондратьев, Крапивин, 2004). Хозяйственная деятельность человека способствует повышению интенсивности биологического круговорота углерода (Безуглова, Орлов, 2000).

Сложность оценок обусловлена не только многообразием потоков, но и неравномерностью пулов углерода. Пространственное распределение углекислого газа в атмосфере неоднородно: 90% всех выбросов углерода от сжигаемого органического топлива локализовано в границах между 30 и 60 градусами северной широты (Boden et al., 1994). Время полного перемешивания атмосферы оценивается в период от двух месяцев до двух лет (Кондратьев, Крапивин, 2004). Мировой океан можно разделить на слои или зоны, которые отличаются между

собой скоростью и направлением обмена углекислым газом с атмосферой. Перенос CO₂ на границе «атмосфера-океан» определяется разницей парциального давления в этих двух средах. Его моделирование складывается из многочисленных процессов образования и обрушения волн, формирования пленок (Кондратьев, Крапивин, 2004).

Имеет значение временная шкала оценок потоков и резервуаров. По данным российский исследований (Безуглова, Орлов, 2000), цикл оборота углерода гумосферы, то есть непрерывного гумусового слоя (Ковда, Якушев, 1971), составляет 300-400 лет и не является замкнутым, так как углерод выводится из круговорота на длительный срок в виде карбонатов, торфов, сапропелей, угля, гумуса. Заварзин и Кудеяров (2006) оценивают время пребывания углерода в почвенном органическом веществе (ПОВ) в несколько тысяч лет. Другая причина нарушения цикла – поступление в атмосферу глубинного углекислого газа.

Определение места секвестрации в подобной системе потоков углерода должно отталкиваться от строгой терминологии. Согласно Терминологическому порталу Продовольственной и сельскохозяйственной организации Объединенных наций (ФАО ООН), первое упоминание о секвестрации можно найти в материалах 2009 г. раздела «Земельные и водные ресурсы». В то время этот термин объяснялся как биохимический процесс захвата и удержания углерода.

Англо-русский словарь терминов, названий, выражений Всемирного фонда дикой природы (WWF) предлагает рассматривать термин «секвестрация углерода» как поглощение (абсорбцию) углерода экосистемами или улавливание и хранение углекислого газа в подземных пластах или океане (Кокорин, Скуратовская, Ханыков, 2008). При этом, определение подземного пласта в публикации недается. Глоссарий терминов МГЭИК на сегодняшний день включает «Soil carbon sequestration», который определен как «... изменения в технологиях землепользования, которые увеличивают содержание органического углерода почв и приводят к удалению CO₂ из атмосферы».

Как видно, в большинстве источников сроки размещения углерода в почве не обсуждаются. Тем не менее, скрупулезный поиск автора данной диссертации

позволил найти подобные упоминания. В 2009 г. вышла публикация ФАО ООН «Grassland carbon sequestration: management, policy and economics» (2009), где присутствует определение «секвестрация углерода» как процесс удаления CO₂ из атмосферы и его запасание в пулах углерода *различной продолжительности существования*. Упоминание о длительном запасании углерода в почве появляется в материалах, начиная с 2018 г., однако длительность запасания до настоящего времени находит упоминание в меньшей доле проанализированных материалов.

Наиболее подробное определение предложили Когут и др. (2020, 2021). Он называет секвестрацией органического углерода почвами «...совокупность двух процессов: фотосинтеза и трансформации отмерших растений в ПОВ с периодом минерализации не более 100 лет». Последнее условие затрудняет оценку потоков, поэтому часто исследователи не разделяют секвестрацию и депонирование углерода – то есть долговременное запасание ПОВ с периодом минерализации более 100 лет.

Иногда можно столкнуться с критикой в отношении транслитерации словосочетания «carbon sequestration», которое переводят как секвестрация или секвестрирование или секвестрирование. Анализ по ключевым словам публикаций, цитируемых в РИНЦ, показал, что подавляющее число публикаций данной тематики использует термин «секвестрация», тогда как «секвестрирование» применяется в устоявшемся словосочетании «секвестрирование бюджета», а количество публикаций со словом «секвестрирование» составляет всего две.

Таким образом, роль почвенного углерода в митигации глобальных изменений климата и адаптации к их последствиям обусловлен его расположением в глобальном цикле углерода и, в основном, сводится к процессам секвестрации. Научно обоснованное управление, направленное на оптимизацию производственного процесса, является фундаментальной основой для адаптации сельского хозяйства к изменению климата. Современное агропроизводство может и должно стать активным участником регулирования климатической системы через усиление секвестрационного потенциала агроландшафтов и повышение их устойчивости.

Под секвестрацией в данной работе будет подразумеваться определение, наиболее широко представленное в отечественной литературе и сформулированное несколько лет назад Б.М. Когутом и др.

1.3 Стратегии «углеродной» экономики

Обязательства по сокращению выбросов парниковых газов возлагались на страны в рамках Киотского протокола к РКИК ООН, которые действовали до 2012 года. Уже в этом документе был предусмотрен обмен единицами снижения выбросов парниковых газов. Следующий период обязательств был ратифицирован участниками в рамках Дохийской поправки. Конкретная цель по сдерживанию роста средней температуры Земли, чтобы она не превысила 2 градусов по Цельсию над уровнем значения индустриального периода, была задокументирована только в Парижском соглашении по климату 2015 года. Однако цели по сокращению выбросов в этом документе носят добровольный характер. Это сподвигло Европейскую комиссию объединить климатические инициативы в «Европейский зеленый курс» в 2019 году, где констатирована цель достичь углеродной нейтральности к 2050 году. Этот документ описывает перечень инициатив, которые принуждают к выполнению Парижского соглашения не только страны ЕС, но и их торговых партнеров путем введения «пограничного корректирующего углеродного механизма» (Carbon Border Adjustment Mechanism) взимания платы за продукцию в соответствии с ее углеродным следом.

Положение дел на международной арене стимулировало соответствующий ответ в национальном законодательстве. Указ Президента России от 4 ноября 2020 г. № 666 «О сокращении выбросов парниковых газов» предполагает снижение до 70% от уровня 1990 г. с учетом максимально возможной поглощающей способности лесов. Эта же цель была официально заявлена в Секретариат РКИК ООН. При этом к 2018 году выбросы уже сократились на 30,4% без учета изменения в землепользовании и лесном хозяйстве и на 47,6% с его учетом. Следующим шагом в России был принят Федеральный закон от 02.07.2021 г. № 296-ФЗ «Об ограничении выбросов парниковых газов» (далее – 296-ФЗ). В нем задокументирована основная терминология, определен порядок формирования

кадастра парниковых газов, реестра выбросов парниковых газов, реестра углеродных единиц и их верификации. Согласно документу, с 2024 года отчетность в области эмиссии парниковых газов требуется от организаций с их эквивалентной массой 50 и более тысяч тонн углекислого газа в год. Наконец, 6 августа 2025 года был обнародован указ Президента Российской Федерации № 547 «О сокращении выбросов парниковых газов», в котором скорректирована цель по сокращению выбросов до 65-67%.

У Российской Федерации есть природный потенциал стать выгодоприобретателем в мировой индустрии углеродных единиц. Потенциал обусловлен рядом факторов, в том числе уровнем углеродоемкости экспорта нашей страны (рис. 1.2) (Битва за климат, 2021).

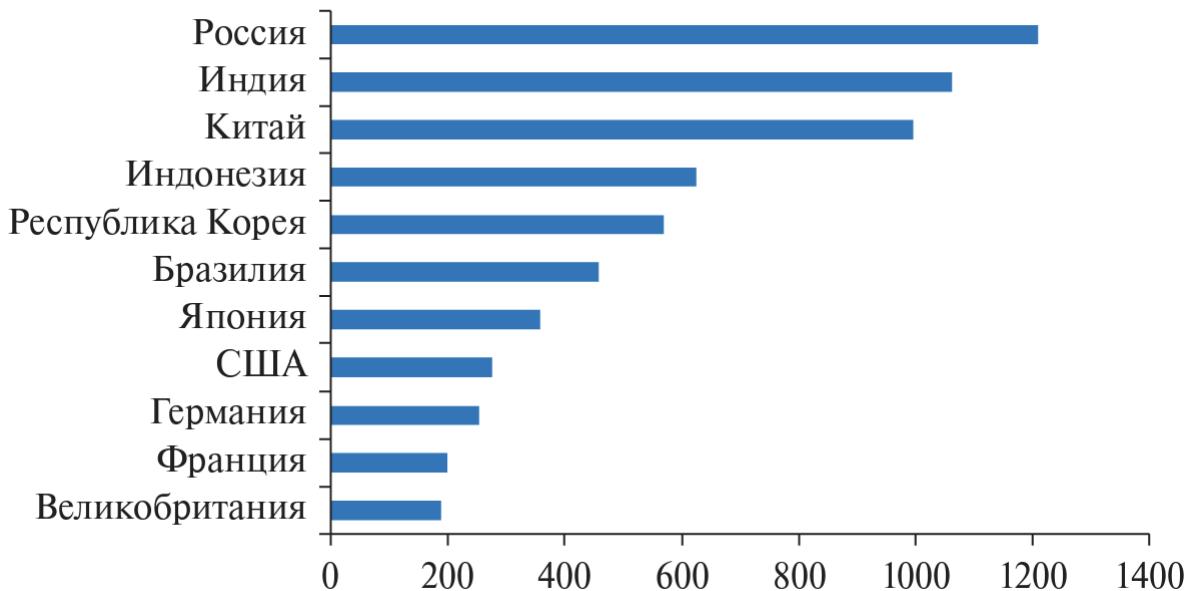


Рисунок 1.2 – Уровень углеродоемкости экспорта крупнейших стран мировой экономики в 2015 г., т CO₂/млн долл. (Битва за климат, 2021)

В экспертном докладе НИУ ВШЭ (Битва за климат, 2021) в перечне мер по развитию углеродной экономики в России предложено создание системы торговли выбросами и углеродного налога, а также обеспечение уточнения научных знаний о поглощениях углерода на сельскохозяйственных землях в рамках карбоновых полигонов. Для стимулирования внедрения технологий сокращения выбросов парниковых газов, формирования систем верификации, обращения углеродных

единиц и единиц выполнения квоты 1 сентября 2022 г. был дан старт так называемому Сахалинскому эксперименту (№34-ФЗ от 06.03.2022). Первый выпуск углеродных единиц и пробные сделки были совершены внутри данного проекта в том же году, в его рамках отрабатываются механизмы взаимодействия всех субъектов углеродной экономики.

Регулирование выбросов парниковых газов будет осуществляться методом квотирования компаний. В каждой отрасли будут выбраны несколько эталонных с точки зрения объемов выбросов компаний. Уровень их выбросов будет считаться целью, а разница между этой оценкой и выбросами отдельно взятой компанией будет для последней равна ее квоте. Покрытие квоты возможно реализацией природного климатического проекта и последующей верификацией в углеродных единицах или же покупкой излишков углеродных единиц у других компаний. Согласно 296-ФЗ: углеродная единица соответствует 1 т сокращения, предотвращения или увеличения поглощения парниковых газов, выраженных в тоннах CO₂-эквивалента. Инструментами реализации инициативы квотирования выбросов парниковых газов будут являться налоговые и штрафные меры.

В декабре 2023 г. Минэкономразвития России распространило проект Плана мероприятий по реализации Стратегии социально-экономического развития Российской Федерации с низким уровнем выбросов парниковых газов до 2050 г. Ведомство изучает возможность взимания платы за выбросы парниковых газов (что де facto и является так называемым углеродным налогом) с 2028 г. В этот год планируется завершение пилотного Сахалинского климатического эксперимента. Одним из итогов этого эксперимента в 2023 г. оказалось установление квот на выбросы парниковых газов для 35 сахалинских компаний

Для снижения концентрации углекислого газа в атмосфере бенефициары могут воспользоваться одной или сочетанием нескольких стратегий. Такие стратегии делятся на те, которые предотвращают поступление этого газа в атмосферу (улавливание и хранение углерода / carbon capture and storage - CCS), и те, которые извлекают уже поступивший (удаление углекислого газа / carbon dioxide removal – CDR).

Предотвращение эмиссии методом улавливание и хранение углерода обеспечивается использованием мембран и адсорбентов для улавливания и последующей транспортировки углекислого газа в подземные хранилища, например, отработанные месторождения. Если углекислый газ используют в производстве, то метод относят к методу улавливания и утилизации (carbon capture and utilization - CCU). Иногда совокупность описанных методов называют методами улавливания, утилизации и секвестрации (carbon capture, utilization, and sequestration - CCUS) (рис.1.3).

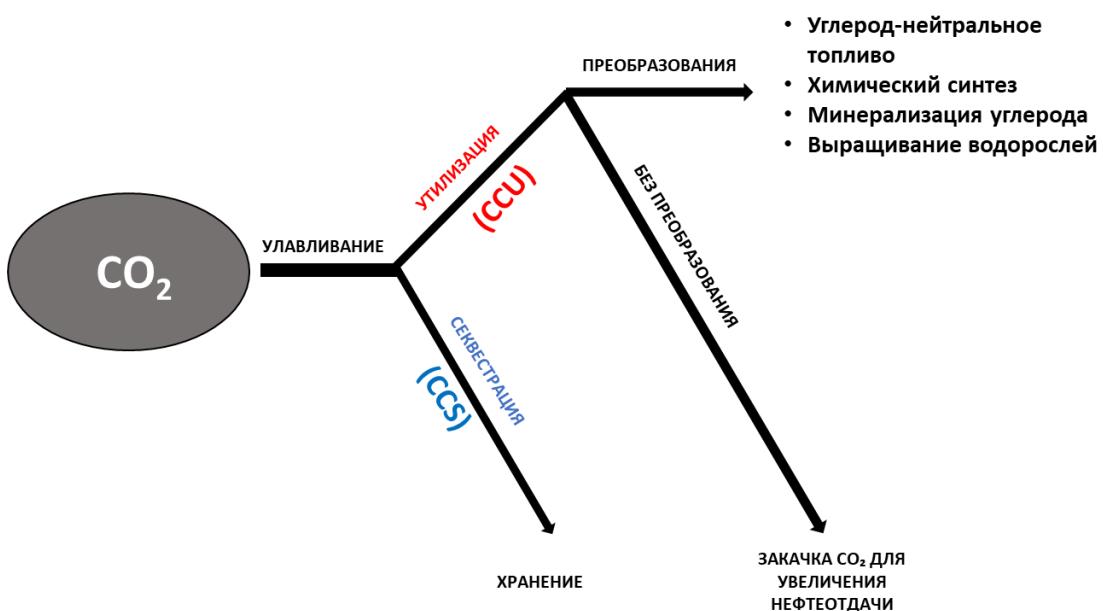


Рисунок 1.3 – Технологии улавливания и хранения углерода

Биологическая секвестрация, которая относится к косвенным методам извлечения и депонирования, подразумевает поглощение углекислого газа атмосферы растениями, почвами, Мировым океаном и др. Она входит в сектор мер смягчения последствий изменения климата (The Agriculture, Forestry and Other Land Use - AFOLU), который охватывает управляемые экосистемы (Summary for policymakers, 2019). Биологическая секвестрация является широко практикуемой стратегией наряду с посадкой деревьев и восстановлением или сохранением лесов (Бурукина, 2023). Она также может предполагать культивацию живых сред искусственно (например, биочар) или восстановление абсорбирующей углерод способности нативных экосистем, подвергшихся обезлесению или опустыниванию или загрязнению.

Отдельным пунктом для современных исследователей стоит выбор оптимальных методов по определению запаса углерода с целью его глобального мониторинга. Существует целый ряд методик, каждая из которых имеет свои преимущества и недостатки. Как правило, наиболее точные методы (например, газовая хроматография) требуют скрупулезной подготовки, оборудования высокой стоимости, большой калибровочной базы. Полевые методы, в целом, не позволяют взять в мониторинг большие территории. Дистанционные же легко масштабируются, однако имеют более высокий уровень неопределенности, требуют верификацию полевыми методами. Комбинация этих вариантов остается решением, которое принимается на экспертном уровне.

Таким образом, Российская Федерация обладает значительным природным потенциалом для лидерства в глобальной углеродной экономике.

1.4 Сохранение почвенного углерода как метод управления почвенным плодородием

1.4.1 Факторы, влияющие на выбросы парниковых газов в сельском хозяйстве

По оценке экспертов, на долю сельского хозяйства приходится 30% поглощения и 9% эмиссии углерода. Согласно Киотскому протоколу к Рамочной конвенции ООН по изменению климата (Рамочная конвенция ООН об изменении климата, 1992), в секторе сельского хозяйства в категорию источников и поглотителей парниковых газов включены следующие категории (Киотский протокол, 1997): интенциональная ферментация, уборка, хранение и использование навоза, производство риса, сельскохозяйственные земли, управляемый пал саванн, сжигание сельскохозяйственных отходов на полях.

По данным Росгидромета, верхний слой почвы содержит 337 Гт С, из них 28 Гт С имеет органическое происхождение и находятся в пределах сельскохозяйственных угодий (Третий оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории РФ, 2022). Считается, что с момента индустриальной революции, произошедшей на планете на рубеже XVIII—XIX

веков, человечеством утрачено порядка 136 Гт почвенного углерода (Карпухин, Байкин, Батыршина, 2021). Отечественные исследователи высказывают мнение, что работа в секторе сельского хозяйства является ключевой при решении вопроса изменения климата (Иванов и др., 2021а).

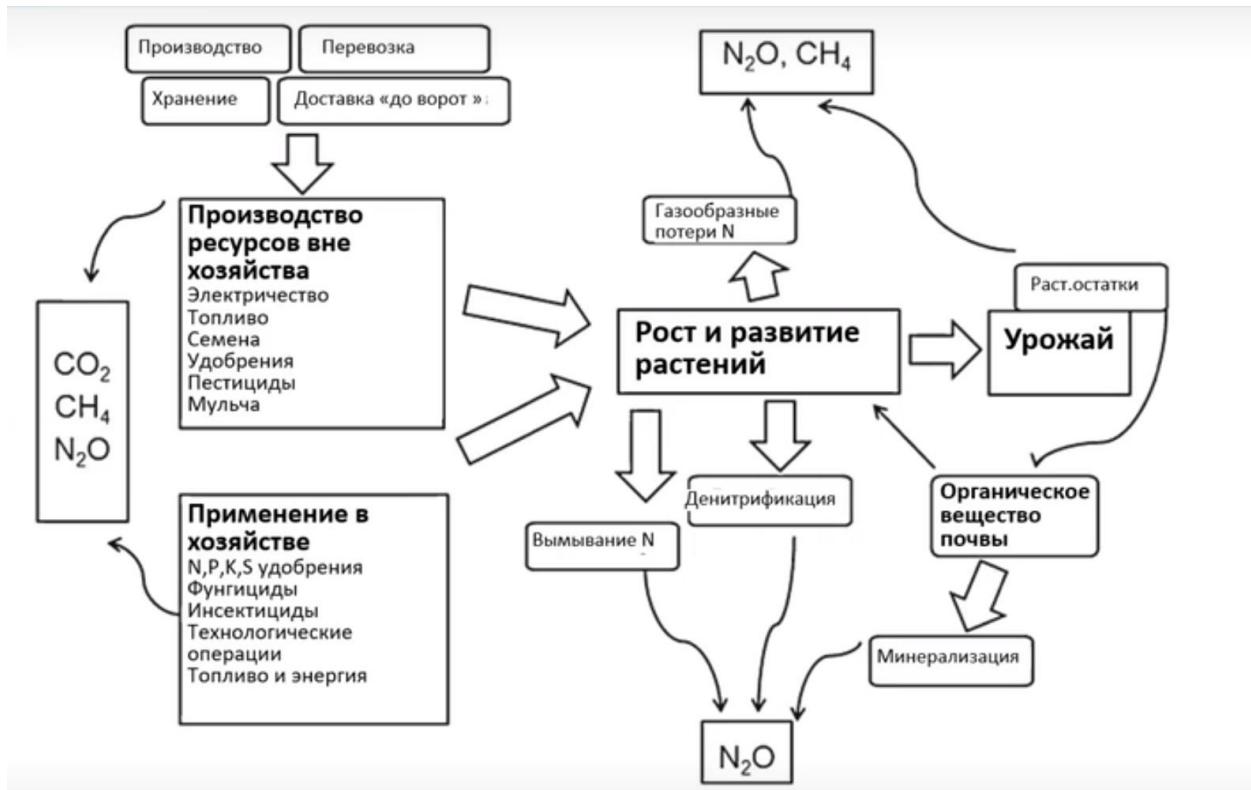


Рисунок 1.4 – Основные факторы, влияющие на выбросы парниковых газов в растениеводстве (Liu et al., 2016, с дополнениями)

Инициативы по введению углеродной маркировки на продукцию дали толчок научным исследованиям в части того, из чего складывается так называемый углеродный след продукции. Основные факторы, влияющие на выбросы парниковых газов при возделывании сельскохозяйственных культур изображены на рис. 1.4. Видно, что это не только природные факторы и результаты естественных процессов. Весомый вклад привносят производство сырья, необходимого для возделывания (семена, удобрения, ГСМ), их применение, хранение, доставки и другие операционные процессы.

При расчете углеродного следа следует учитывать регион исследования для учета таких процессов, как секвестрация углерода, вызванная применением азотных удобрений, запашки соломы и технологий no-till, а также эмиссия метана

из рисовых чеков. Это обусловлено различным откликом системы на указанные процессы.

Способность человека влиять на динамику потоков углекислого газа признана в научном сообществе (Кондратьев, Крапивин, 2004). В.И. Вернадский написал: «...человек сейчас намеренно или стихийно меняет всю окружающую его природу, является геологической силой, ближайшее будущее которой почти безгранично, и человеческий разум и воля способны целиком переработать всю окружающую его природу» (Вернадский, 2001). В пространственном выражении за последние 400 лет плотность численности населения на единицу суши увеличилась почти в 50 раз, а площади лесов сократились в три раза, в основном, по причине смены на окультуренные типы ландшафта (Кондратьев, Крапивин, 2004). В современном мире в области сельского хозяйства изменения в цикле углерода происходят не только за счет смены типа землепользования, но из-за технологий обработки земель, которые применяются внутри периода одного землепользования. Очевидно, что влияние человека в этом случае ограничено. Однако, где эта грань, и какими факторами она определена – неизвестно.

На международном уровне признано, что скорость секвестрации – это функция многих параметров, среди которых можно назвать почвенные характеристики, типы и практики землепользования (Иванов и др., 2021б). Именно направленное изменение последних считается инструментом человечества для изменения объемов стока углерода в области сельского хозяйства.

1.4.2 Анализ терминологии в области ресурсосберегающего земледелия

Терминология в области почвозащитного и ресурсосберегающего земледелия разнообразна. В зарубежной литературе климат-ориентированные практики часто называют «climate-smart agriculture», а методы землепользования, обеспечивающие секвестрацию углерода почвами, названы углеродным земледелием (carbon farming). Хотя до настоящего времени нет универсальных наборов практик по увеличению запасов почвенного углерода (и, вероятно, никогда не будет), главным механизмом такого хозяйствования является регуляция баланса продуцирования и минерализации органического вещества (Lal et al., 2018; Paustian

et al., 2019a). В отечественной научной литературе земледелие называют *регенеративным* (regenerative agriculture), если внимание человека направлено на процессы первой группы (восстановления органического вещества почвы) (Столбовой, 2020).

Обзор истории развития терминов сделан специалистами ФАО в 2022 г. (Cabral et al., 2022). Согласно этому источнику, регенеративное сельское хозяйство имеет в своей основе ряд принципов органического земледелия. Этот термин впервые прозвучал в 80-ых годах как «регенеративная органическая система». Термин «регенеративное сельское хозяйство» объединяет экологические, социальные, экономические и духовные измерения (Rhodes, 2017). Тем не менее, исследования показали, что в литературе термин фокусируется на экологических аспектах устойчивости, в то время как социально-экономические проблемы определяются только в общем и не имеют основы для реализации (Schreefel et al., 2020). С этим связана текущая ситуация, где мы наблюдаем, что трактовка термина дается различными международными органами и частными компаниями в соответствии со своими интересами. Агропродовольственные корпорации быстро внедряют концепции регенеративного сельского хозяйства и инвестируют в них, продвигая свои конкретные интерпретации того, что они должны означать (Cabral et al., 2022). Так, мировой производитель средств защиты растений Syngenta считает, что регенеративное сельское хозяйство не может исключать применение пестицидов.

В последние годы начал набирать популярность молодой термин «nature-based solutions». Только в 2022 г. официально было закреплено определение этого термина на сессии Ассамблеи ООН по окружающей среде (ЮНЕА): «действия по защите, сохранению, восстановлению, устойчивому использованию и управлению природными ресурсами; или модифицированные наземные, пресноводные, прибрежные и морские экосистемы, которые эффективно и адаптивно решают социальные, экономические и экологические проблемы, одновременно обеспечивая благополучие человека, экосистемные услуги, а также преимущества в области устойчивости и биоразнообразия». Термин до сих пор остается

расплывчатым, несмотря на свою растущую популярность. В последнем отчете ФАО по формированию карты потенциала секвестрации почвенного углерода сельхозугодиями (GSOCseq) нереализованный потенциал почв по секвестрации углерода называется одним из «nature-based» решений по смягчению последствий изменения климата и адаптации к нему (Global Soil Organic Carbon Sequestration Potential Map – SOCseq v.1.1.: technical report, 2022).

Специалисты ФАО отмечают пересечения терминов регенеративное земледелие и «nature-based solutions» с термином агроэкология (Cabral et al., 2022). Последний является старейшим из них и особенно выделяется ФАО как один из подходов устойчивого развития. В 2018 г. ФАО было выпущено руководство по переходу к устойчивым агропродовольственным системам «10 принципов агроэкологии». В нем подчеркивается, что цель агроэкологии – это «оптимальное взаимодействие между растительным и животным миром, человеком и окружающей средой с учетом социальных аспектов, необходимых для создания устойчивых и справедливых продовольственных систем» (Руководство по переходу к устойчивым агропродовольственным системам, 2018). Агроэкологический подход предполагает глубинные преобразования агропродовольственной системы и долгосрочные решения ради устранения коренных причин имеющихся проблем. Он основан на десяти взаимосвязанных и взаимозависимых компонентах (рис.1.5). На схеме видно, что агроэкология интегрирует экологическую целостность, социальную справедливость и экономическую жизнеспособность, затрагивая практически все аспекты человеческой деятельности для достижения глобальных целей устойчивого развития.

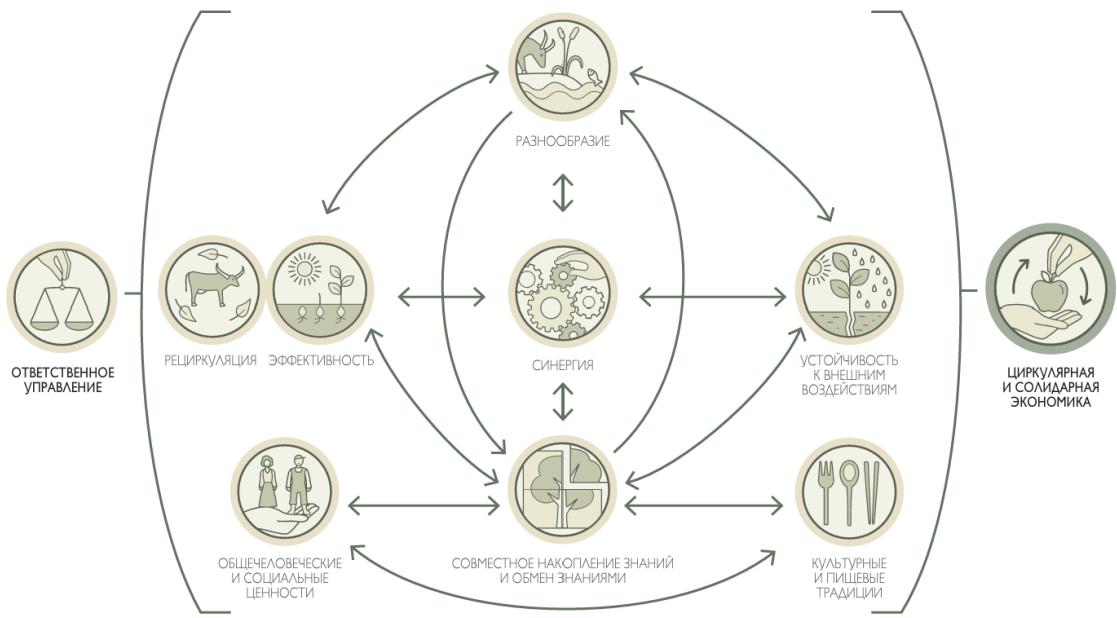


Рисунок 1.5 – Десять компонентов агроэкологии (Руководство по переходу к устойчивым агропродовольственным системам, 2018)

В практике оценки потенциала секвестрации почв общепринятым термином остается «рациональное использование почвенных ресурсов (РИПР)» (Soil Sustainable Management – SSM). Согласно руководству ФАО, под секвестрацией почвенного углерода понимается увеличение его органического и неорганического пулов вследствие РИПР (Peralta et al., 2022).

1.4.3 Меры, направленные на сохранение почвенного углерода

В 2016 г. были опубликованы Добровольные руководящие принципы РИПР (Добровольные руководящие принципы..., 2017), которые содержат общие рекомендации. Они являются комплексными и включают в себя десять пунктов:

1. «Минимизация эрозии почв.
2. Повышение содержания органического вещества в почве.
3. Обеспечение баланса и циклов питательных веществ в почве.
4. Предотвращение, минимизация и смягчение засоления и осолонцевания почв.
5. Предотвращение и минимизация загрязнения почв.
6. Предотвращение и минимизация подкисления почв.

7. Сохранение и увеличение биоразнообразия почв.
8. Минимизация запечатывания почвы.
9. Предотвращение и минимизация уплотнения почвы.
10. Совершенствование управления почвенной влагой».

Задачи и методы обеспечения повышения почвенного органического вещества предполагается решать следующим образом (табл. 1.1) (Добровольные руководящие принципы..., 2017).

Таблица 1.1

Задачи и методы решения для реализации принципа повышения почвенного органического вещества

Задача	Методы решения
Увеличение производства биомассы путем повышения доступности воды для растений	1.Капельное или микросплинкерное орошение 2.Графики полива 3.Мониторинг почвенной влаги или потерь воды на суммарное испарение
Защита богатых органическим углеродом почв торфяников, лесов, пастбищных угодий	-
Увеличение содержания органического вещества	1.Использование отходов растениеводства 2.Возделывание кормовых культур для выпаса, а не сенокоса 3.Ведение органического сельского хозяйства 4.Комплексное управление плодородием почв и комплексная борьба с вредителями 5.Внесение в почву навоза или других богатых углеродом отходов 6.Использование компоста 7.Внесение мульчи или использование постоянного покрова почвы
Ограничение потерь функций почвы вследствие пала	1.Исключение пала или строгое планирование его сроков и интенсивности 2.Мероприятия по минимизации эрозии и стимулированию восстановления растительного покрова в зонах риска возникновения природных пожаров
Улучшенное восстановление земель под паром	Использование сидеральных и бобовых культур
Обеспечение достаточного органического покрова почвы	Живые изгороди
Снижение скорости распада органического вещества почвы	Уменьшение числа и глубины обработки почвы или отказ от механической обработки почвы без увеличения использования гербицидов.
Прочее	1.Оптимальное использование всех источников органики 2.Внедрение севооборотов, включение в севооборот бобовых (включая зернобобовые) или оптимизация набора культур

Таблица 1.2

Меры сохранения почвенного углерода (Amelung et al., 2020)

Мера	Эффект	Целевые почвы
Работа с удобрениями и органическими остатками	Повышение плодородия и урожайности почв: — с низким содержанием питательных веществ; — с низким содержанием органического углерода; — засоленных	Почвы в натуральных хозяйствах, особенно в регионах с низкой урожайностью, например: — сильно выветрелые почвы; — песчаные почвы; — полузасушливые почвы
Известкование	Повышение плодородия подкисленных почв и возврата пожнивных остатков; снижение выбросов N ₂ O	Распространенные виды сельскохозяйственных почв с кислой реакцией
Применение биоугля	Улучшение физико-химических свойств почвы; сокращение выбросов N ₂ O и NH ₄	Сильно выветрелые почвы и тропические ареносоли. Подтопленные почвы под рисом
Мульчирование (например, при бесспахотной обработке) и выращивание покровных культур	Повышение содержания органического углерода почвы; охлаждение, сохранение влаги, защита от эрозии, продление сельскохозяйственного сезона в тропиках и субтропиках	Почвы с большим «углеродным долгом». Почвы, подверженные тепловому воздействию
Обработка почвы, например гряд и борозд; сокращение или полный отказ от вспахивания	Снижение интенсивности разложения органического углерода почвы за счет защиты структуры почвы и уменьшения аэрации	Почвы, подвергающиеся подтоплению и эрозии
Глубокое рыхление и вспахивание (переворачивание) почвы, рыхление глинистого	Внесение подпочвенного углерода с повышением урожайности	Твердый грунт
Регулирование водного режима (например, ирригация)	Повышение урожайности в засушливых районах, регулирование засоленности почв при дренировании	Плодородные полузасушливые почвы, засоленные почвы
Организация систем растениеводства, например, точное земледелие, использование смесей культур, комбинированное хозяйство (например, выращивание риса и разведение креветок)	Оптимизация использования ресурсов и секвестрация органического углерода почв в пространственно неоднородных ландшафтах или при временно	Многие виды пахотных почв

Мера	Эффект	Целевые почвы
	неравномерном водоснабжении	
Регулирование водного режима (например, подтопление)	Снижение интенсивности разложения органического углерода почвы за счет повторного увлажнения и недопущения дренажа	Временно подтопленные почвы — например, рисовые плантации или почвы вблизи рек; торфяные болота и органические почвы, почвы с грунтовыми или застойными водами.

Существуют и другие, более развернутые, представления о том, какие меры должны приниматься с целью сохранения почвенного углерода (табл.1.2).

Первое представление — экосистемно-ориентированное, направленное на сохранение углерода через управление органическим веществом и предотвращение деградации. Второе — технологически-ориентированное, фокусирующееся на адаптации методов под специфические почвенные условия и снижение эмиссии газов через агрохимические решения. Оба подхода могут дополнять друг друга в комплексной стратегии устойчивого землепользования.

Другие направления для повышения почвенного органического вещества состоят в следующем: введение в практику с целью сохранения углерода смешанных посевов (*intercropping*), покровных посевов, агролесоводства, ротационного выпаса скота, предпочтения многолетних культур однолетним. Снижает эмиссию введение бобовых в севооборот за счет снижения использования азотных удобрений (Liu et al., 2016), использование удобрений пролонгированного действия.

Ряд исследователей высказывают мнение о необходимости развития селекции в особом, регенеративном направлении (Иванов и др., 2021б). По их словам, необходимо работать над качествами замедленного старения листьев, экономии питательных веществ, приспособленности к локальным условиям, стабильной урожайности, устойчивости к вредителям и болезням.

При разработке климатических проектов, направленных на изменение запасов органического углерода в почве на пахотных землях, необходимо руководствоваться методологией, разработанной Институтом глобального климата

и экологии имени академика Ю. А. Израэля (Изменение запасов органического углерода в почве на пахотных землях, 2023). Этот документ вводит термин устойчивого управления сельскохозяйственными угодьями (УУСУ), который «включает целостный подход к созданию продуктивных и работоспособных экосистем путем интеграции социальных, экономических, физических и биологических потребностей и ценностей, а также способствует устойчивому развитию сельских районов». Согласно ему, в перечень практик по устойчивому управлению почвами входит:

- «а) минимизация обработки почвы;
- б) сбалансированное использование химических удобрений;
- в) оптимизация использования органических удобрений (навозные удобрения, растительные остатки, компост, дигестаты (материал, остающийся после анаэробного сбраживания биоразлагаемого сырья), биочар (пироуголь);
- г) оптимизация использования неорганических удобрений (известняк, гипс для кислых почв, гипс – для щелочных почв);
- д) использование биологических препаратов и микроорганизмов (микоризы, фосфат-солюбилизирующие бактерии, био-инокулянты, биостимуляторы);
- е) управление растительными остатками (мульчирование или постоянное покрытие почвы);
- ж) выращивание покровных культур, использование в севообороте зеленых удобрений или многолетних культур;
- з) оптимизированное управление водными ресурсами для повышения объема биомассы;
- и) борьба с уплотнением почвы (согласованное движение техники по полю; использование многолетних растений со стержневой корневой системой в качестве «био-буров» (люцерна, клевер, древесные растения, ягодные кустарники, рапс, кормовой редис, редька, свекла, дикий шафран, озимый рапс, шафран, подсолнечник, желтая горчица); безотвальная обработка почвы);

к) диверсификация и использование севооборотов, комбинированное использование различных практик: агролесоводство, интегрированное с пастбищами и земледельческими угодьями.

л) борьба с эрозией с помощью террасирования, управления поверхностными водными ресурсами и контролю за дренажными системами;

м) целенаправленное высаживание автохтонных (коренных) для данной местности растений, что доказано способствует восстановлению структуры почвы и почвенной микробиоты» (Изменение запасов органического углерода в почве на пахотных землях, 2023, с.24).

Основные исследования источников и поглотителей парниковых газов, в том числе механизмы повышения способности почв к улавливанию и депонированию углерода, в нашей стране проводятся в рамках работы карбоновых полигонов. Приказ Министерства науки и высшего образования Российской Федерации от 5 февраля 2021 г. № 74 «О полигонах для разработки и испытаний технологий контроля углеродного баланса» положил начало pilotному проекту по созданию полигонов для разработки и испытаний технологий контроля углеродного баланса как специально оборудованных участков местности, используемых для разработки и испытаний технологий дистанционного и наземного контроля эмиссии парниковых газов и других значимых для изменения климата параметров и проведения исследований источников и поглотителей парниковых газов. Такие площадки называют карбоновыми полигонами.

Согласно докладу Минобрнауки России «Карбоновые полигоны, pilotный проект – итоги первого года» (2021), одной из задач работ на карбоновых полигонах является «Разработка и адаптация технологий дистанционного мониторинга структуры и состояния растительного и почвенного покрова, эмиссии и поглощения парниковых газов с использованием данных наземных измерений и методов математического моделирования» (Третьяков и др., 2022). Целью функционирования таких полигонов до 2025 г. является внедрение различных типов данных (дистанционных, полевых и т.д.) в общую модель потоков углерода, а также оценка эмиссии парниковых газов на основе данных наземных и

дистанционных методов (программа карбонового полигона «Урал-Карбон» в Свердловской области). В этой связи в данной научной работе производится сравнение результатов моделирования на базе общедоступных данных и на основе данных, полученных в ходе полевых исследований на карбоновом полигоне «Чашниково».

Таким образом, сохранение почвенного углерода является важным инструментом повышения плодородия почв и смягчения климатических изменений. Ключевые меры включают минимизацию обработки почвы, использование органических удобрений, агролесоводство и внедрение технологий точного земледелия, направленных на оптимизацию углеродного баланса.

1.5 Глобальная карта секвестрации почвенного углерода (GSOCseq)

В 2017 г. Двадцать третьей сессии Конференции сторон Рамочной конвенция ООН по изменению климата (РКИК ООН) принято решение об осуществлении Коронивийской программы совместной работы в области сельского хозяйства (КПСРСХ). Именно этот документ интегрирует проблемы сельского хозяйства в работу Рамочной конвенции ООН по изменению климата, чтобы способствовать преобразованию агропродовольственных систем, решать вопросы адаптации к изменению климата и смягчения его последствий, обеспечения продуктивности сельского хозяйства. Программа включает шесть пунктов, в том числе «улучшение почвенного углерода, здоровья и плодородия почв пастбищ и пахотных земель...» (Доклад Конференции Сторон о работе ее двадцать третьей сессии, 2018). Внедрение методов устойчивого управления почвенными ресурсами, основанных на сохранении почвенного органического углерода (ПОУ), упоминается также в Специальном докладе МГЭИК «Изменение климата и земля» (Специальный доклад МГЭИК об изменении климата, 2019), в отчетах Международной группы по ресурсам (International Resource Panel, IRP), созданной Программой ООН по окружающей среде (ЮНЕП). Конечно, подобные методы также прямо или косвенно способствуют реализации многих из 17 целей ООН в области устойчивого развития.

Цель 15 провозглашает своей задачей 15.3 «бороться с опустыниванием, восстановить деградировавшие земли и почвы, включая земли, пострадавшие от опустынивания, засухи и наводнений, и стремиться к созданию мира, нейтрального в отношении деградации земель». Эффективность ее реализации оценивается индикатором 15.3.1 «доля деградированных земель от общей площади земель» (Sims et al., 2021), который включает промежуточные индикаторы: продуктивность, растительный покров, почвенный углерод.

Для расчета указанного индикатора в 2020 г. Пленарная ассамблея Глобального почвенного партнерства (Global Soil Partnership, GSP) дала инструкции Межгосударственному техническому совету по почвам (Intergovernmental Technical Panel on Soils, ITPS) и секретариату Глобальное почвенное партнерство к разработке Глобальной карты секвестрации почвенного углерода (The Global Soil Organic Carbon Sequestration Potential Map, GSOCseq).

Программа GSOCseq рассматривается как проект, направленный на оценку потенциала секвестрации углерода почвами сельхозугодий путем создания надежных, прозрачных и экономически эффективных механизмов для мониторинга, отчетности и проверки (monitor, report and verify, MRV) изменений в запасах ПОУ (Peralta et al., 2022). Ее основной задачей является преодоление разрыва между странами, обладающими и не обладающими достаточными ресурсами и опытом для создания таких механизмов, через повышение технических знаний в области моделирования и картирования потенциала секвестрации ПОУ.

Основным продуктом данного проекта является карта потенциала секвестрации почвенного углерода, которая моделируется на основе ряда общедоступных и национальных данных по единой методологии. Она представляет собой прогноз скорости изменения запасов углерода до 2040 г. в слое почв 0-30 см согласно трем сценариям. Первый имитирует сохранение неизменных практик хозяйствования (CHX – сценарий неизменного хозяйствования // BAU – business as usual), три другие сценария подразумевают увеличение потока поступления углерода в систему на 5, 10 и 20% от CHX и называются сценариями

рационального использования почвенных ресурсов: РИПР1, РИПР2, РИПР3, соответственно// (Soil Sustainable Management – SSM).

Конечными задачами проекта декларируется:

- Выделение наиболее перспективных с точки зрения секвестрации углерода территорий.
- Установление достижимых и обоснованных национальных целей секвестрации почвами углерода.
- Совершенствование потенциала стран-партнеров в области устойчивого управления почвенными ресурсами, почвенных данных, цифрового картографирования и моделирования почв.

Карта формируется так называемым подходом «снизу вверх»: местными экспертами создаются национальные картографические продукты на основе доступных данных о секвестрации углерода, которые затем собираются в единое. В 2021 г. представлена первая версия карты (Global Soil Organic Carbon Sequestration Potential Map – SOCseq v.1.1.: technical report, 2022). В дальнейшем предлагается совершенствование точности и достоверности собранных данных путем перехода к более подробным уровням моделирования и углублению опыта экспертов.

Основные задачи Коронивийской программы совместной работы в области сельского хозяйства (2017) и проекта GSOCseq – поддержка стран в достижении целей устойчивого развития и совершенствование методов мониторинга и моделирования для оптимизации агропрактик.

1.6 Почвенный углерод в теории углеродного цикла

Круговорот углерода в системе почва-растение-атмосфера представляет собой звено глобального круговорота и схематично представлено на рисунке 1.6.

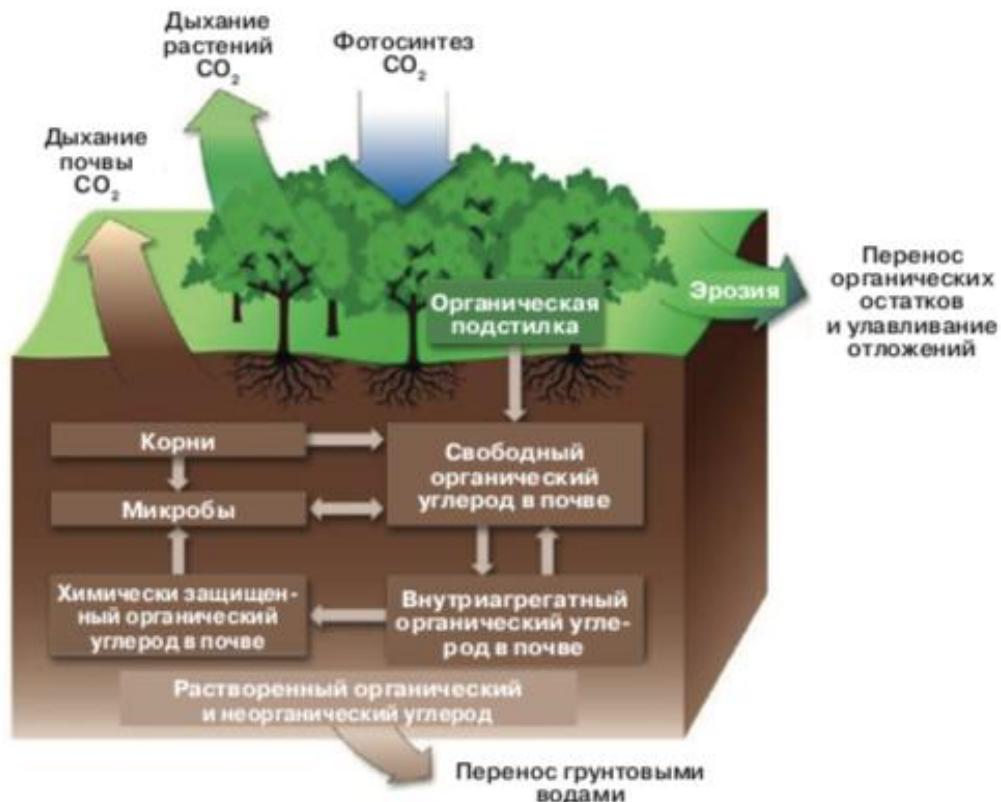


Рисунок 1.6 – Трансформация и миграция углерода в почве (Carbon Transformation and Transport in Soil, 2015; Битва за климат, 2021)

Для решения балансовых задач принято представление в виде пулов и процессов перемещения между ними. Перечень обменных процессов с участием углерода и элементов питания (ЭП) предложен Титляновой (2014):

- «Фотосинтез и автотрофное дыхание;
- Продуцирование тканей надземных и подземных органов растений;
- Потребление корнями ЭП из почвы и подстилки;
- Транслокация ЭП из корней в надземные органы и закрепление в них;
- Вымывание ЭП из листья и стволов или перехват ЭП листвой из дождей;
- Выделение из корней экссудатов в почву;
- Ретранслокация сахаров и ЭП из стареющих органов в растущие;
- Отмирание надземных органов, их опад и отпад;
- Поступление ЭП с опадом и отпадом в мортмассу;

- Отмирание подземных органов – корнепад и поступление ЭП в подземную мортмассу;
- Разложение подстилки и освобождение ЭП;
- Выщелачивание ЭП из подстилки;
- Разложение подземной мортмассы и освобождение ЭП;
- Гумификация мортмассы и закрепление ЭП в почвенном органическом веществе» (Титлянова, 2014, с.772).

Все потоки вещества между пулами характеризуются интенсивностью, а пулы - запасами. Считается, что в стационарном режиме все процессы сбалансираны, и запасы постоянны. Когда интенсивность одних процессов превышает интенсивность процессов дальнейшей цепочки, то происходит накопление запасов. В работах других авторов (Баренбаум, 2000) подтверждается, что, исходя из принципа Ле Шателье, в стационарном режиме соблюдается постоянство удельной скорости изменения запасов вещества (т.е. «интенсивность»):

$$\frac{n_i}{\tau_i} = C = \text{const}, \quad (1.1)$$

где n – запасы, а τ – единица времени пребывания углерода в i -ом резервуаре (пule). Эта константа для сбалансированной системы составляет $(2,7 \pm 0,05) 10^{17}$ г СО₂/год (Бурков, Крапивин, Шалаев, 2012).

Изменение запасов углерода в почве можно определить как баланс процессов поступления (процесс 1) и стока (процесс 2) ПОУ. Тогда можно выделить ряд факторов, которые будут определять их интенсивность (табл. 1.3).

Эрозионные процессы имеют значение лишь на малых территориях, тогда как в более крупных масштабах считаются лишь перераспределением углерода в ландшафте (Paustian et al., 2019a). Факторы, определяющие интенсивность указанных процессов поступления и потерь, в обязательном порядке должны учитываться при их имитации углеродными моделями. Скорость разложения определяется температурой, влажностью и аэрацией почв, ее уровнем кислотности. Гранулометрический и минералогический состав влияет на образование органо-

минеральных компонентов (Paustian et al., 2019a). Процессы поступления углерода зависят от типа растительности и ее продуктивности, которая во многом является функцией агроклиматического потенциала местности, доступности питательных элементов и других лимитирующих факторов. При прочих равных условиях потоки углерода по накоплению, трансформации и миграции зависят от типа ландшафта и от того, является ли он агро- или биоландшафтом (Безуглова, Орлов, 2000). Когда речь заходит об управляемых ландшафтах, то в факторы также включаются принятые практики землепользования.

Таблица 1.3

Процессы, определяющие баланс поступления и потерь углерода из почвы.

Поступление углерода	Сток углерода
Поступление растительных остатков	Потери CO ₂ в процессе минерализации органического вещества (гетеротрофное дыхание)
Поступление органических удобрений	Потери CH ₄ вследствие анаэробных процессов (затопление)
	Выщелачивание растворенного ПОУ
	Эрозия

Исследователями было обнаружено явление взаимозависимости поступления органических остатков и их минерализации, названное «эффектом прайминга» (priming effect) (Guttières et al., 2021). Он заключается в стимуляции разложения поступлением свежего ПОВ, а одним из его механизмов предполагается активизация микроорганизмов. Ключевыми факторами интенсивности эффекта прайминга являются степень разложения поступающих органических остатков (свежая солома способствовала увеличению выбросов на 800% в сравнении с предварительно разложившейся) и почвенный покров. Они имеют влияние более заметное, чем даже температура и наличие питательных веществ.

Звено взаимодействия атмосферного и биосферного пулов углерода раскрывается в процессах производства первичной продукции и разложения органического вещества. Они имеют определенную зависимость от температуры и концентрации углекислого газа в окружающей среде (Кондратьев, Крапивин,

2004). Температурная зависимость должна проявляться наиболее ощутимо в северных широтах ввиду значительной вариации среднегодовых температур и продолжительности вегетационного периода культур.

Продукцией считается количество вещества, созданное фитоценозом за единицу времени, при этом *чистая первичная продукция* (net primary production, NPP) определяется процессами фотосинтеза (gross primary production, GPP) и дыхания (*Resp*):

$$NPP = GPP - Resp \quad (1.2)$$

Далее продукция расходуется на увеличение живой фитомассы, которая со временем переходит в мортмассу, далее потребляется фитофагами. Также часть NPP приходится на корневые выделения и продукты вымывания осадками из надземной фитомассы. Продукция измеряется в единице массы на единицу площади за единицу времени (например, г/м² в месяц).

Существуют различные подходы к аппроксимации чистой первичной продукции. Оценка потока CO₂ из атмосферы в биомассу растений находится в пределах 16,7 – 35,0 ГтC/год. Предложены методы, требующие в качестве параметров температуру окружающей среды, тип растительности и концентрацию углекислого газа в атмосфере (Кондратьев, Крапивин, 2004, Bjorkstrom, 1979). Включение в модель эмпирических зависимостей между температурой, осадками и продуктивностью фитомассы сделаны, например, Вилковой и др. (1998).

Метод оценки продукции – вопрос первостепенной важности, так как разные подходы могут давать различия в 2-3 раза (Титлянова и др., 2018). Считается, что почвенная секвестрация углерода ограничена в первую очередь NPP, а уже затем – свойствами почвы (Семёнов, Когут, Иванов, 2025). В рекомендациях ФАО по оценке скорости секвестрации ежегодное поступление углерода в систему рассчитывается на основе оценки NPP по модели MIAMI (Smith et al., 2005). Такой подход относится к эмпирическим и не требует оценки показателей фотосинтеза и дыхания (Корзухин, 2014). Он заключается в расчете продукции по температурному показателю и показателю увлажнения в отдельности по формулам 1.3 и 1.4 и дальнейший выбор наименьшего из них:

$$NPP (T) = \frac{3000}{1+e^{1,315-0,119T}} = \quad (1.3)$$

$$NPP (P) = 3000 \times 1 - e^{-0,000664P} \quad (1.4)$$

В результате NPP выражено в граммах сухой массы на м² в год, который затем умножается на коэффициент, соответствующий типу землепользования, и переводится в т С/га в год по формуле 1.5:

$$NPP \left[\frac{\text{тС}}{\text{га}} \text{ в год} \right] = NPP \left[\frac{\Gamma}{\text{м}^2} \text{ в год} \right] \times 0,01 \times 0,48 \quad (1.5)$$

Парциальное давление CO₂ в атмосфере оказывает влияние на продуктивность растительности исходя из ее типа. C-3 растения (это самый распространенный тип растений, использующих цикл Кальвина для фиксации углерода в процессе фотосинтеза) чувствительны к концентрации углекислого газа и характеризуются интенсивным процессом фотодыхания (потеря промежуточных продуктов фотосинтеза в виде CO₂). C-4 растения (это тип растений, которые разработали механизм, позволяющий им эффективно фиксировать углерод в условиях низкого содержания CO₂ и высоких температур) практически не откликаются на концентрацию углекислого газа в атмосфере, а интенсивность фотодыхания у них ничтожно мала. Если удвоение парциального давления углекислого газа в атмосфере для C-3 растений способствует росту скорости фотосинтеза с 10 до 100%, то C-4 растения уже находятся в условном состоянии насыщения фотосинтеза (Кондратьев, Крапивин, 2004). Изложенное говорит об индивидуальной роли каждой культуры в биогеохимическом цикле углерода. Существует необходимость уточнения оценок потоков углерода в системе растение-атмосфера, исходя из более подробного подхода к типам почвенно-растительных формаций.

При рассмотрении процессов трансформации и миграции углерода в контексте его запасов следует принимать во внимание три особенности (Peralta et al., 2022). Первая заключается в том, что существует некое равновесие

традиционного набора и интенсивности указанных процессов, и требуется несколько десятилетий для достижения нового равновесного состояния после внешнего воздействия. Приблизительно этот временной отрезок будет считаться откликом системы. Вторая особенность – обратимость нового равновесного состояния при возвращении к традиционным практикам землепользования, что может обернуться утратой всех достигших целей по увеличению темпов секвестрации. Третья особенность заключается в том, что у минеральных почв может быть достаточно высокая углеродпротекторная емкость. Вследствие этого наблюдается эффект, когда богатые углеродом почвы априорно уже сильно насыщены углеродом, в то время как минеральные почвы еще далеки до полной реализации своего потенциала (Six et al., 2002).

Подход ФАО, на котором базируется расчет потенциала секвестрации почвы, основан на разделении почвенного углерода на органический (ПОУ – soil organic carbon, SOC) и неорганический (soil inorganic carbon, SIC). В методических рекомендациях по построению карты GSOCmap перечислены компоненты, которые являются источниками главного держателя углерода почв - почвенного органического вещества (ПОВ): подстилка, корни, почвенная фауна, микробная биомасса, продукты биотических процессов (например, микробного разложения), простые составляющие (сахара, полисахариды) (Peralta et al., 2022).

В современных исследованиях можно наблюдать два подхода к разделению пулов органического вещества: по процессным пулам и по структурным пулам. Первый подход используется в процесс-ориентированных моделях, одна из которых применена в данном исследовании (RothC). Второй принцип соответствует новому континуальному представлению ПОВ в оппозицию гуминовой теории (Лебедева и др., 2024). Традиционно гуминовые вещества считают результатом деградации органических остатков и вторичного синтеза (гумификации), выделяют щелочами, вследствие чего подразделяют на гуминовые кислоты, фульвокислоты и гумин. Однако согласно последним определениям, ПОВ – это континuum частиц от твердых органических размером 0,053-2 мм (Particulate Organic Matter, POM) до связанных с минералами органических веществ размером

<0,053 мм (Mineral-associated Organic Matter, МОМ) (Lavallee et al., 2020; Семёнов и др., 2023). РОМ состоит из лабильного свежего незащищенного вещества и растительных остатков с периодом разложения до нескольких десятилетий, МОМ – из стабильного тонкодисперсного, связанного с минеральными частицами органического вещества с периодом разложения от десятков до сотен лет. Считается, что свободного органического вещества в почве гораздо меньше, чем связанного (Кононова, 1963). Предполагается, что пул РОМ является своеобразным маркером поступления углерода в почву, а МОМ – его стабилизации. Именно первый из них содержит большую долю ПОВ и чувствителен к управляемым изменениям (Семенов и др., 2023). Он подразделяется на свободную фракцию (плотностью менее 1,6 г/см³) и окклюдирующую фракцию (плотностью более 1,6 г/см³), где к первой относятся слабо разложившиеся растительные и животные остатки, микробная биомасса, а ко второй – гумифицированные вещества и продукты неполного разложения.

В пул неорганического почвенного углерода (SIC) авторами ФАО включаются карбонаты и бикарбонаты педогенного происхождения, которые сосредоточены, в основном, в нижележащих горизонтах. Запас органического и неорганического углерода в метровом слое почвы составляет, соответственно, 1500-2400 Гт С и 700-1700 Гт С (Peralta et al., 2022). Поскольку запас ПОВ представляет собой разность между поступившим и разложившимся органическим материалом, необходимо принимать во внимание, что эти два процесса имеют различные оптимумы по температуре и влажности (Заварзин, Кудеяров, 2006). Отсюда вытекает различное соотношение доли вовлеченного в эти процессы углерода в зависимости от локальных условий.

Основными составляющими почвенной секвестрации углерода являются трансформация атмосферного CO₂ в биомассу растений и его трансформация в стабильный ПОУ путем образования органо-минеральных комплексов (Когут и др., 2020; Lal et al., 2018). Количество стабилизированного в почве и защищенного от разложения органического углерода называют углеродпротекторной емкостью (Carbon Protection Capacity, CPC) (рис. 1.7).

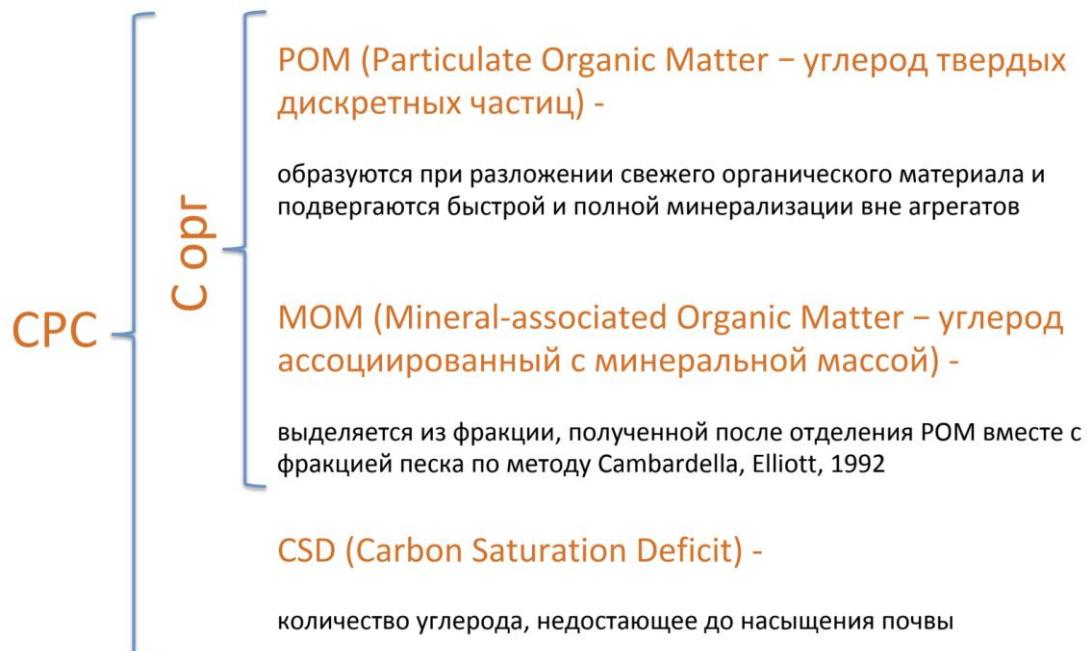


Рисунок 1.7 – Дифференциация стабилизированного ПОУ в разрезе потенциала секвестрации (По Когуту и др., 2020). CPC - углеродпротекторная емкость, CSD – недостающее до насыщения количество углерода

Оно рассчитывается по гранулометрическому составу. Эта емкость частично занята органическим углеродом, а частично свободна. Количество углерода, недостающее до насыщения почвы, называется Carbon Saturation Deficit (CSD). Если этот показатель пересчитать на запас «недостачи» в слое почвы, то получим углеродсеквострирующий потенциал (Carbon Sequestration Potential, CSP). Имеющийся же органический углерод может быть ассоциирован с минеральной массой и входить в МОМ или находиться в твердых дискретных частицах и подвергаться быстрой и полной минерализации вне агрегатов и составлять РОМ (Когут и др., 2020). Длительное депонирование углерода в почве обеспечивает органическое вещество, связанное с минеральной частью. Именно на образование этого пула углерода и направлены меры РИПР (рационального использования почвенных ресурсов).

Под стабилизацией органического вещества в почве подразумевают увеличение времени его оборачиваемости в почве за счет появления

резистентности к разложению (Семенов и др., 2013). Она включает в себя широкий спектр механизмов, которые можно разделить на взаимодействие биомолекул с образованием гуминовых веществ (основной путь стабилизации) и группу процессов без стадии их образования. В первой группе процессов минеральные частицы играют роль катализаторов, сорбентов молекул органического происхождения, а также субстратов для самосборки гуминовых веществ (Семенов и др., 2013). Образование органо-минеральных комплексов происходит через катионные мостики между функциональными группами органического вещества и частицами минералов. Кроме того, высказано предположение, что амфи菲尔ные молекулы покрывают минеральные частицы двуслойной пленкой органического вещества (Wu et al., 2005).

Физико-химические (абиотические) процессы стабилизации второй группы зависят от размеров частиц ПОВ, полученных в ходе его деструкции. Они включают цементацию, обугливание, инкустацию, окклюзию, седиментацию, сорбцию, коагуляцию, флокуляцию, инкапсуляцию, комплексацию, интеркаляцию, защемление в микропорах макроорганического, взвешенного и растворимого органического вещества (Семенов и др., 2013). Определение этих процессов и их соответствие размеру частиц ПОВ приведено в таблице 1.4. Окклюзия является наиболее распространенным путем стабилизации органического вещества. Подавляющая часть ПОВ находится в окклюдированном состоянии, что на порядок увеличивает его устойчивость к минерализации (Von Lützow et al., 2008).

ПОВ различно по устойчивости к деструкции в зависимости от размеров содержащих его агрегатов: время оборачиваемости в макроагрегатах составляет 15-50 лет, в микроагрегатах – 100-300 лет (Семенов и др., 2013).

Образование новых агрегатов и, соответственно, интенсивность образования нового стабилизированного ПОВ контролируется поступлением свежих растительных остатков, способствующих развитию микроорганизмов, тогда как гуминовые вещества отвечают за поддержание устойчивости к разложению уже образованных агрегатов (Albers et al., 2008). Помимо абиотической стабилизации и

стабилизации через стадию образования гуминовых веществ существует путь биологической стабилизации, однако он приводит к относительно краткосрочной стабилизации.

Таблица 1.4

Абиотические процессы стабилизации ПОВ без стадии образования гуминовых веществ

Размер частицы ПОВ	Процесс стабилизации
Макроорганическое вещество (>2000 мкм)	Цементация – захват ПОВ при смешивании пылеватых минеральных частиц с водой и последующем высыхании Обугливание – образование углеподобных частиц при окислении или неполном сгорании ПОВ на поверхности Инкрустация – вкрапление твердых частиц ПОВ в растительные остатки и другие вещества Окклузия – изоляция ПОВ от микроорганизмов путем покрытия частиц минеральной фракцией пыли и глины
Органическое вещество взвеси (>53 мкм)	Седиментация – переход частиц из взвеси в осадок Сорбция Окклузия
Растворимое органическое вещество (<45 мкм)	Седиментация Сорбция Комплексация – образование структур с металлоцентром и органическими лигандами путем возникновения координационных связей Интеркаляция – попадание молекул ПОВ в межслойное пространство глинистых минералов Зашемление в микропорах глинистых минералов (микропоры должны быть меньше размеров микроорганизмов) Коагуляция Флокуляция – разновидность коагуляции с образованием хлопьевидных скоплений Инкапсуляция – захват одной частицы ПОВ внутрь другой
Биомолекулы ($<20–50$ нм)	Комплексация Интеркаляция Зашемление в микропорах глинистых минералов Инкапсуляция Образование органо-минеральных комплексов Образование агрегатов гуминовых веществ

Стоит отметить, что выше описан структурный подход к разделению пулов органического вещества. В случае, когда есть необходимость оценки потенциала минерализации ПОВ, следует придерживаться процессного подхода к разделению органического вещества. В этом случае прибегают к оценке активного (потенциально-минерализуемого) пула (Семенов и др., 2023).

В настоящее время есть несоответствие разделения компонентов органического вещества подхода пулов с подходом фракционирования. Последний не дает разделить компоненты ПОВ, различные по кинетике или функциональности. Не учитываются факторы, влияющие на динамику компонентов ПОВ, взаимодействие между органическими и минеральными соединениями, а также доступность для организмов и ферментов (Sollins et al., 1996; Wander et al., 2004).

Существует противоречие между методами изучения органического вещества почв: попытки «измерять моделируемое» (подгонка данных под концептуальные модели) или «моделировать измеряемое» (адаптация моделей к экспериментальным данным) сталкиваются с ограничениями (Шеин и др., 2016). Физическое фракционирование выделяет фракции, связанные с агрегатами, но не учитывает химическую стабилизацию, а химические методы игнорируют физические свойства. Выделяемые фракции часто неоднородны динамически (например, смесь лабильных и устойчивых компонентов), что усложняет их соответствие модельным пулам. Комбинированные подходы (физико-химические методы) и интеграция экспериментальных данных с моделями повышают точность, но требуют стандартизации и проверки на уникальность и динамическую однородность фракций.

Таким образом, круговорот углерода в системе почва-растение-атмосфера моделируется через баланс пулов и процессов, где ключевыми факторами выступают температура, влажность, тип почвы и землепользование. Существующие подходы к моделированию сталкиваются с рядом трудностей. Для повышения точности моделей необходима интеграция экспериментальных данных и совершенствования моделей, глубокое изучение соответствия модельных пулов реальным фракциям.

1.7 Моделирование прогноза изменений запасов органического вещества как главного показателя почвенного плодородия

Самым распространенным в настоящее время способом оценки и мониторинга баланса углерода и парниковых газов на национальном уровне

является эмпирическое моделирование для прогноза изменений запасов органического вещества почвы. В качестве **первого** уровня таких расчетов используются предложенные экспертно МГЭИК (Land Use, Land Use Change, and Forestry, 2000) данные о запасах углерода в эталонных естественных экосистемах и коэффициенты изменения запасов для возделываемых земель, стратифицированные по климату и типам почв, оценивающие изменение запасов во времени при смене способов землепользования и технологий (Paustian et al., 2019a).

Корректировка на основе имеющейся внутри страны информации позволяет перейти на **второй** уровень оценки с «использованием более точной информации о почвах, климате и наземном покрове, чем рекомендовано экспертами МГЭИК для уровня 1» (Иванов и др., 2021а). В качестве источника такой информации в России предложено использовать, например, почвенную карту РСФСР масштаба 1:2 500 000.

Биогеохимическим моделям, описывающим трансформацию ПОВ, выделяется особое место в прогнозе отклика на изменение циклов вследствие глобального изменения климата. Они подразделяются на концептуально-балансовые (статические модели, описывающие квазистационарное состояние) и динамические модели. Общим для них является представление системы в виде диаграммы компартментов (пулов) и потоков между ними.

Основные современные подходы к глобальному круговороту углерода были рассмотрены Кондратьевым и Крапивиным (2004). Общие черты для всех подходов заключаются в временном (один год) и пространственном (в пределах точности глобальных баз данных) разрешении. Традиционно способность биосфера нейтрализовать избыток выделяемого углекислого газа в атмосферу оценивается глобальными моделями типа «природа – общество». Они учитывают демографические, макроэкономические, политические и другие факторы. В них функция почв встраивается путем добавления сельскохозяйственного блока как показателя интенсивности производства пищи (Кондратьев, Крапивин, 2004). Последняя является функцией от площадей сельскохозяйственных угодий и их

продуктивности. В перечень факторов, влияющих на уровень продуктивности, попадает объем инвестиций в отрасль: высокие урожаи требуют больших энергетических затрат.

Хотя динамические углеродные модели используются в основном как инструмент для фундаментальных исследований, они все чаще применяются и в национальных масштабах для целей инвентаризации почвенного углерода и парниковых газов в почве. Подобный подход позволяет перейти к **третьему** уровню анализа как составной части схемы организации работы по созданию Национальной системы наблюдения и учета баланса углерода на сельскохозяйственных и лесохозяйственных землях России (Иванов и др., 2021а, б). Возможность использования моделей основана на их настройке по данным наземных мониторинговых и полевых исследований, использующих пространственно распределенные данные о почве, климате и управляющих воздействиях, в том числе дистанционные и данных длительных полевых опытов (Иванов и др., 2021а; Harden et al., 2018; Paustian et al., 2019б). Такие модели могут обеспечить надежную и недорогую количественную оценку изменений запасов углерода в почве и потоков парниковых газов для анализа на национальном уровне, поддержке национальных программ и международных соглашений. Они могут осуществлять оценку вклада различных технологий землепользования в кратко-, средне- и долгосрочном масштабах (Blanco-Canqui et al., 2009).

В работах Рыжовой, Романенкова и Степаненко (2024), а также Семёнова и Ташкина (2022а) дан обзор актуальных динамических моделей углеродного цикла. Они могут быть глобальными или отражать лишь часть процессов, выделенных в масштабе экосистем (например, болотные) или определенных, исходя из держателей процессов (например, модель атмосфера-растение-почва). Последние модели названы локальными. Углеродные модели являются набором так называемых фазовых переменных, которые являются пулами углерода в том или ином виде, а также функций обмена углерода между ними (потоков). Именно блочный принцип построения моделей позволяет относить их к разряду имитационных (Розенберг, 2017). Этот подход способствует уходу от «проклятия

многомерности» (Bartsev et al., 2008). В конечном счете балансовая динамическая модель потоков углерода в системе представляет собой систему дифференциальных уравнений, решением которой оказываются функции потока углерода между его пулами.

Одной из распространенных моделей является экосистемная модель CENTURY, которая основана на идее обмена углеродом и биофильными элементами между почвой и растениями, представленными пулами. При этом блок органического вещества почв считается отдельной подмоделью и включает в себя несколько пулов. Эта модель часто используется для решения экологических проблем (Шеин и др., 2016).

Также стоит упомянуть нелинейную модель круговорота углерода NAMSOM (Nonlinear Analytical Model of Soil Organic Matter), разработанную в 21м веке отечественными учеными (Рыжова, 2003). Она представляет собой систему из двух дифференциальных уравнений, с помощью которых возможно рассчитать стационарный запас углерода в почве.

В недавнем времени предложена идея использования конструктора моделей углеродного цикла – КМУЦ (Файкин и др., 2025). Он представляет собой программный комплекс, в котором собраны дифференциальные уравнения нескольких моделей углеродного цикла. Его преимущество заключается в том, что исследователь может настраивать КМУЦ под свои цели, выбирая определенную модель из заложенных, пространственную и временную сетку моделирования.

Альтернативно методике МГЭИК рекомендуется использование модели биогеохимических циклов углерода и азота DNDC (DeNitrification-DeComposition). Её применение наряду с моделью RothC также допускается ФАО для оценки эмиссии парниковых газов сельскохозяйственных угодий. Модель была апробирована (Суховеева, 2018) и параметризована для оценки компонентов биогеохимического цикла углерода в пахотных почвах европейской территории России (Суховеева и др., 2019). Обе эти имитационные модели адекватно оценивают дыхание почвы и запасы углерода в ней. Однако RothC считается более универсальной и подходит для широкого набора культур и участков почвы без

растительности. DNDC же лучше подходит для зерновых культур, так как недооценивает эмиссию CO₂ с залежных участков. Существует мнение, что учет азотно-углеродного взаимодействия может влиять на моделируемые объемы эмиссии углекислого газа, однако в последних отечественных исследованиях это пока не подтвердилось (Суховеева и др., 2019).

В конце 70-ых гг. появилась первая версия модели RothC, созданная на основе Ротамстедского длительного полевого опыта (Coleman et al., 1996; Шеин и др., 2016). Эта модель построена на учете явления различной устойчивости к разложению компонентов ПОВ, что позволяет относить ее к компартментальным моделям. Модель RothC предполагает существование нескольких пулов ПОВ с различными константами скорости разложения. Именно количество пулов определяет точность описания динамики подобных моделей (Шеин и др., 2016). В отличие от организм-ориентированных моделей, процесс-ориентированная модель RothC сосредоточена на потоках вещества, а роль микробных сообществ в ней задается в неявном виде путем введение отдельного микробного пула.

Модель RothC имеет шаг длиной в месяц и позволяет вводить данные о температуре, осадках, почвенных характеристиках и растительном покрове (Coleman et al., 1996). Именно эти факторы отражают высокую пространственную неоднородность условий и делают потоки углерода наиболее неопределенными звеньями в глобальном цикле углерода (Harris et al., 2012). Преимуществом модели RothC является ее доступность, совместимость с пространственными данными ГИС, масштабируемость от региональных до глобальных размеров (Peralta et al., 2022). Существует ряд альтернативных моделей, которые не уступают рассматриваемой (Campbell et al., 2015). Тем не менее, ФАО предложено использовать RothC для проекта GSOCseq по следующим причинам (Peralta et al., 2022):

1. Наиболее доступные входные данные, требуемые для работы.
2. Модель прошла апробацию на данных длительных опытов различных экосистем, климатических условий, почв и типах землепользования, а также на масштабах различного уровня.

3. Модель уже применялась ранее для оценки эмиссии CO₂.

Ротамстедская модель включает пять пулов, структура которого показана на рисунке 1.8 (Шеин и др., 2016; Jenkinson et al., 1977; Jenkinson, 1990; Coleman et al., 1996). Первоначально вещество поступает в систему в виде растительных остатков и относится к пулу «разлагаемого растительного материала» (decomposable plant material, DPM) или «стойкого растительного материала» (resistant plant material, RPM).

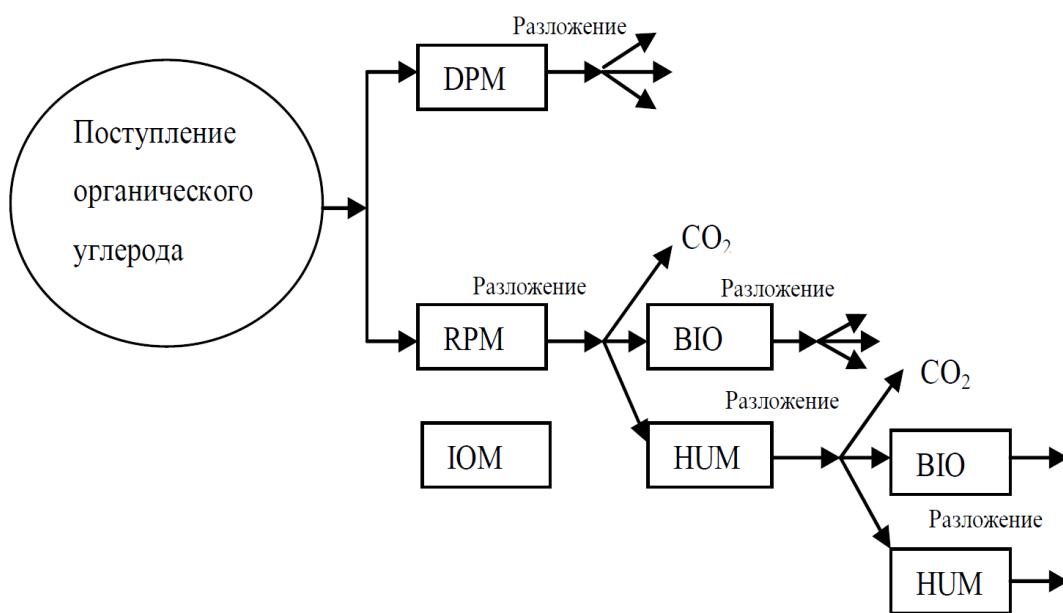


Рисунок 1.8 – Структура углеродной модели RothC (Coleman et al., 1996; Шеин и др., 2016)

По умолчанию соотношение DPM/RPM составляет 59/41, для необрабатываемых лугов и кустарниковой растительности оно меняется на 40/60, для лиственных и тропических лесов – 20/80 (Peralta et al., 2022).

Затем вещество претерпевает трансформацию и частично выделяется в виде CO₂, а частично переходит в пулы «микробная биомасса» (BIO) и «гумифицированное органическое вещество» (HUM). Соотношение пулов CO₂ и (BIO + HUM) определяется гранулометрическим составом почвы. Соотношение же между пулами BIO и HUM определяется активностью микробиоты и фактором стабилизации, по умолчанию используется отношение 46/54 (Peralta et al., 2022). Каждый пул имеет свои характеристики скоростей разложения. Таким образом,

ПОВ проходит путь от одного пула к другому с возрастающей устойчивостью к разложению (Peralta et al., 2022). Если на вход активного пула поступает Y т С/га, то в конце периода (месяца) его количество составляет Ye^{-abckt} т С/га (Peralta et al., 2022).

Последний, пятый, пул модели – это инертное органическое вещество (inert organic matter, IOM), средний возраст которого 50 тыс. лет (Coleman et al., 1996). Его объем рассчитывается по формуле в т С/га:

$$IOM = 0,049 \times \text{ПОУ}^{1,139} \quad (1.6)$$

В данной модели учтена зависимость констант разложения от гранулометрического состава почвы путем увеличения потока вещества в пулы BIO и HUM с ростом содержания глины в ущерб выделения CO₂ (Coleman et al., 1996). Это приводит к отражению факта большей стабильности органического вещества в тяжелых почвах. Однако такой способ не учитывает именно механизмы стабилизации, а задается лишь эмпирически (Шеин и др., 2016). Существуют модели, уделяющие большое внимание именно процессам стабилизации, например, концептуальная модель фон Лютцов с соавт. (Von Lutzow et al., 2008). Модели, совмещающие прогноз количества вещества и стабилизационную функцию, требуют гораздо больших технических знаний и опыта в области моделирования, что нецелесообразно, так как будет усложнять выполнение программы GSOCseq.

Пока нет достоверных оценок необходимой детализации для достижения оптимальной точности моделирования (Кондратьев, Крапивин, 2004). По ожиданиям ФАО, дальнейшие версии карты GSOCseq должны содержать локальные адаптации стандартизованного подхода, например, могут описывать дополнительные типы землепользования или альтернативные/мультимодельные имитационные подходы, использовать реальные функции взамен эмпирических, описывать малоизученные типы почв (рисовые угодия, заболоченные или аридные типы почв) (Peralta et al., 2022).

Доступность адекватных входных данных признана одним из пробелов в необходимых знаниях для качественного прогноза. Необходимый уровень

детальности описания всех пулов углерода и процессов его перехода может быть найден с помощью моделирования методом его пошагового усложнения. Согласно рекомендациям МГЭИК, страны должны модернизировать методику оценки баланса углерода и парниковых газов путем перехода на более высокий уровень подробности от первого к третьему, описанному выше (IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, 2006; Иванов и др., 2021а). Попытки перехода на другие базы данных предпринимались автором ранее в части уточнения климатической информации (Добровольская, Шабалина, Мешалкина, 2023а, Добровольская, Шабалина, 2023в). В данной работе выдвинуто предположение о значимом улучшении прогноза путем уточнения данных поступления органического вещества в систему.

В заключение, моделирование динамики органического вещества почвы представляет собой многоуровневый процесс, эволюционирующий от эмпирических оценок (уровень 1) к комплексным динамическим моделям (уровень 3), таким как RothC, CENTURY и DNDC. Эти инструменты, интегрирующие данные о почве, климате и антропогенных воздействиях, позволяют прогнозировать изменения углеродного баланса и поддерживать реализацию климатических инициатив, включая национальные системы мониторинга. Несмотря на их широкое применение, ключевым вызовом остается повышение точности прогнозов за счет уточнения входных параметров, адаптации моделей для специфических экосистем и интеграции новых данных. Дальнейшее развитие методологии, включая мульти модельные подходы и учет региональной специфики, будет способствовать более эффективному управлению почвенными ресурсами в условиях глобальных изменений.

ГЛАВА 2. ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

2.1 Объекты исследования

2.1.1 Зональный ряд пахотных почв

Объектом исследования послужил зональный ряд пахотных почв Европейской территории России от дерново-подзолистых до каштановых, расположенных на территории десяти областей: Новгородская, Тверская, Московская, Калужская, Тульская, Брянская, Липецкая, Воронежская, Белгородская, Ростовская (рис.2.1).



Рисунок 2.1 – Схема с расположением исследуемых областей

Они были разделены по принципу почвенно-экологического районирования по принадлежности к почвенной зоне (Урусевская, 2020). В результате получили 20 объектов, характеристика которых представлена в таблице 2.1 и на рисунке 2.2.

Таблица 2.1

Характеристика единиц объекта исследования.

	Объект	Преобладающие типы почв	Площадь пахотных почв, га
Зона Е дерново-подзолистых почв южной тайги			
1	Новгородская область	Дерново-подзолистые	508,9
2	Тверская область	Дерново-подзолистые	419,7
3	Московская область (центральная часть)	Дерново-подзолистые	942,0
4	Калужская область (север)	Дерново-подзолистые	637,3
5	Брянская область (север)	Дерново-подзолистые	558,1
Зона Л серых лесных почв лиственных лесов			
6	Московская область (юг)	Серые лесные и черноземы оподзоленные Дерново-подзолистые	150,7
7	Калужская область (юг)	Серые лесные и черноземы оподзоленные	318,6
8	Тульская область (север)	Серые лесные и черноземы оподзоленные	778,1
9	Брянская область (юг)	Серые лесные и черноземы оподзоленные	558,1
Зона М оподзоленных, выщелоченных и типичных черноземов и серых лесных почв лесостепи			
10	Московская область (самый юг)	Черноземы выщелоченные	37,7
11	Тульская область (юг)	Черноземы выщелоченные	778,1
12	Липецкая область	Черноземы выщелоченные	1553,5
13	Воронежская область (север)	Черноземы выщелоченные	1826,9
14	Белгородская область (север)	Черноземы типичные и оподзоленные	1096,5
Зона Н обыкновенных и южных черноземов степи			
15	Воронежская область (юг)	Черноземы типичные, обыкновенные и оподзоленные	1217,9
16	Белгородская область (юг)	Черноземы типичные и оподзоленные	548,2
17	Ростовская область (запад)	Черноземы южные	4167,4
Зона О темно-каштановых и каштановых почв сухой степи			
18	Ростовская область (с-в)	Каштановые и темно-каштановые	234,7
19	Ростовская область (ю-в)	Каштановые и темно-каштановые	1488,3
Зона Р светло-каштановых и бурых почв полупустыни			
20	Ростовская область (в)	Светло-каштановые	63,0

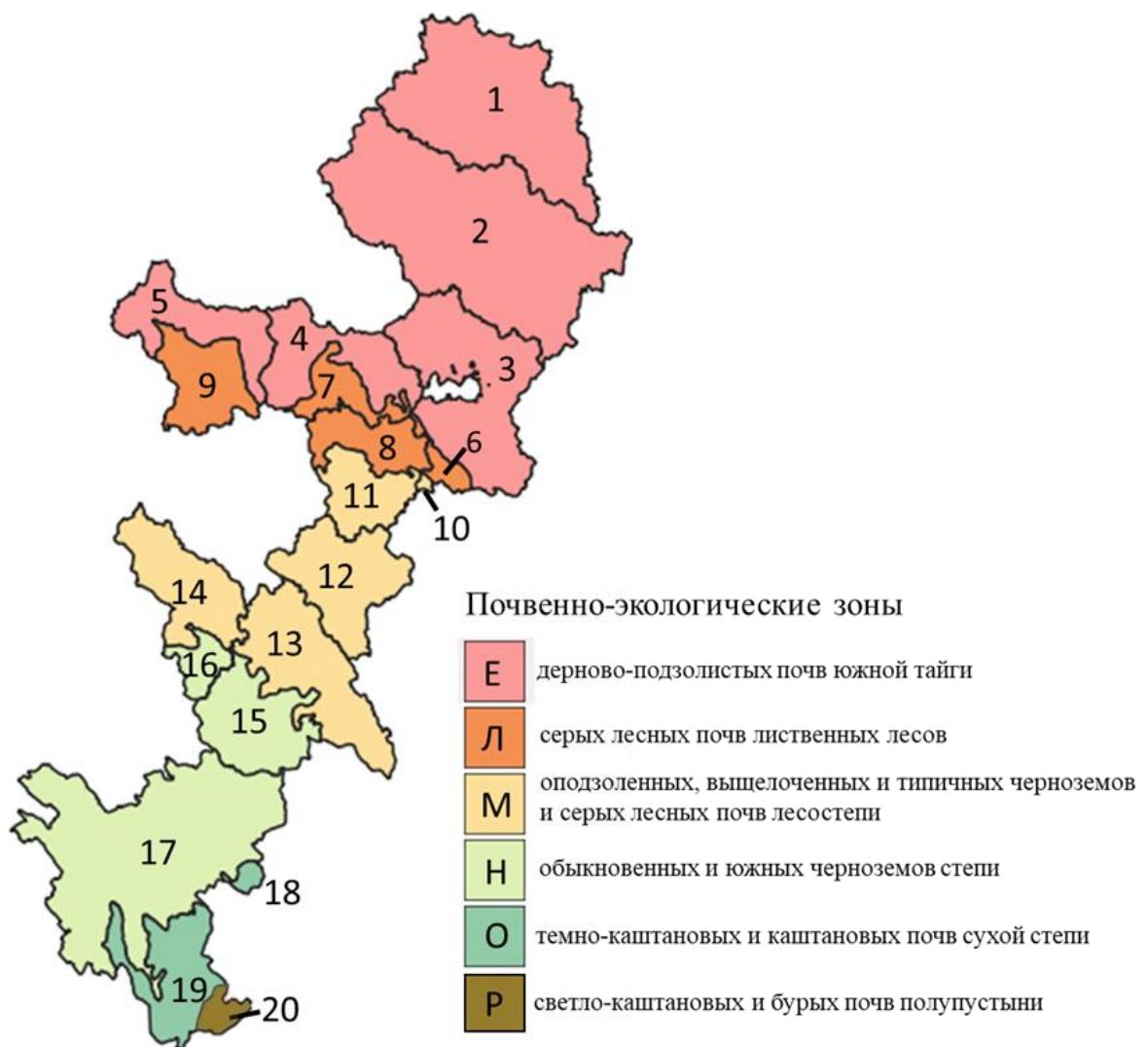


Рисунок 2.2 – Схема расположения исследуемых объектов и их соответствия почвенно-экологическим зонам

Переход к подробной входной информации дал возможность анализа секвестрации углерода на более низком административном уровне. Для этой цели каждая область была разделена на соответствующие муниципальные образования (районы).

Итак, объекты были выбраны и преобразованы (разделены и сгруппированы) таким образом, что в результате охватывают широкий зональный ряд и подходят для решения задач работы, перечисленных в главе 1.

В качестве тестовых областей для применения новой методики расчета NPP и, соответственно, более подробного моделирования были взяты две контрастные по своим характеристикам территории: Московская и Ростовская области. Расчет

неопределенности определения запасов гумуса проводили на примере Московской области. Эти объекты детально охарактеризованы ниже.

2.1.2 Московская область

Московская область расположена в центральной части Восточно-Европейской равнины. Для области характерны возвышенные моренные равнины и ледниковые аллювиальные низины. Подобный рельеф сформирован московским оледенением и эрозионными процессами.

Для Московской области также характерен климат умеренно-континентального типа. Подзона смешанных хвойно-широколиственных лесов занимает север от долины Оки, южнее простирается подзона широколиственных лесов, а к юг расположена в лесостепной зоне. Таким образом, Московскую область по характеру растительности мысленно можно разделить на три части, что было соблюдено также в нашей работе. Среднегодовое количество осадков составляет 500—700 мм в год, среднегодовая температура воздуха – 3,5 - 5,8°C (ИС ПГБД). Здесь леса занимают уже около 40% площади, причем коренные леса замещены мелколиственными.

Почвы Московской областей сформированы на двучленных моренных отложениях Московской стадии оледенения: нижняя толща представлена средне-тяжелосуглинистым материалом, перекрытым покровным слоем (до 70 см) песчано-супесчаных флювиогляциальных отложений (Макеев, Куст, Лебедева, 2016).

На территории Московской области в северной части преобладают дерново-подзолистые почвы, к югу их сменяют серые лесные, а затем – черноземы оподзоленные. Посевная площадь хозяйств всех категорий на 2021 г. составляет почти 530 тыс. га, и с 2015 г. неуклонно сокращается. Структура посевных площадей Московской области: растениеводство нацелено, в первую очередь, на производство кормовых культур. Почвы здесь малоплодородны и требуют систематического внесения удобрений.

Московская область находится вблизи северной границы Центрального федерального округа. По прогнозам Росгидромета, для этого региона следует

ожидать следующих климатообусловленных изменений: сдвиг природных зон и соответствующей растительности на север, аридизация и рост повторяемости экстремальных явлений (Третий оценочный доклад ..., 2022). Наблюдается рост весенних осадков и повышение суммы температур периода вегетации ($>5^{\circ}\text{C}$) на 0,6-1,2 $^{\circ}\text{C}$, что увеличивает теплообеспеченность культур и позволяет переходить к более урожайным позднеспелым сортам сельскохозяйственных культур (Третий оценочный доклад ..., 2022).

Участки, расположенные в УОПЭЦ «Чашниково», Московская область

Участок пробоотбора для расчета неопределенности исследований был расположен на территории карбонового полигона Учебно-опытного почвенно-экологического центра МГУ им. М.В. Ломоносова «Чашниково». Участок находится в Солнечногорском районе Московской области в подзоне южной тайги, зоне хвойно-широколиственных лесов. Основную долю почвенного покрова «Чашниково» занимают дерново-среднеподзолистые почвы с профилем Апах-А2-В1-В2, а в понижениях – с признаками оглеения (Макаров и др., 2019; Овчинникова, Барышникова, 2019). Почвообразующие породы этой территории – двучленные отложения, в которых суглинки покрывают морену. Плоскостная и овражная эрозия являются характерными для данного типа местности типами деградации почв.

Поле, с которого были отобраны пробы, входит в систему так называемого «Дурыкинского севооборота» (56.0400°N , 37.1662°E). До 1999 г. на нем практиковался 4-польный зерно-травяно-пропашной севооборот, после – поле выведено из севооборота и занято злаково-бобовыми травосмесями с периодическим кошением и дискованием (Овчинникова, Барышникова, 2019). Последние три года до пробоотбора (2019-2022 гг.) поле находилось под паром и регулярно подвергалось вспашке (Самсонова и др., 2023).

2.1.3 Ростовская область

Область расположена в южной части Русской равнины в речном бассейне Нижнего Дона. Рельеф образован складчатым горным хребтом, со временем

разрушенным до волнистой равнины. Север представлен Доно-Донецкой эрозионной равниной, юг – невысокой широковолнистой равниной, расчлененной балками и реками без выраженных террас (Назаренко, Павлова, Соколова, 2022).

Климат солнечный, теплый, умеренно-континентальный с возрастанием континентальности с северо-запада на юго-восток. Средняя годовая температура колеблется от 7°С на севере до 10°С на юге, среднемесячная температура января составляет -4°С. Длительность вегетационного периода 160-180 дней. Циклоническая деятельность и высокое испарение создают условия для недостаточности увлажнения, количество осадков уменьшается от запада (550–565 мм в год) к востоку (300–400 мм в год). Сильное воздействие на ветровую обстановку и распределение осадков оказывают особенности мезорельефа. Основная площадь области располагается в зоне дерновино-злаковых степей, лишь небольшой участок на юго-востоке находится в зоне полупустынной полынно-дерновинной злаковой степи.

Почвообразующими породами служат, в основном, лессовидные суглинки, иногда – желто-бурые и красно-бурые глины, меловые отложения, пески. Западное Предкавказье сложено высококарбонатными лессовидными суглинками и глинами.

Почвенный покров Ростовской области сформирован преимущественно в условиях двух почвенно-экологических зон: степной зоны обыкновенных и южных черноземов и сухостепной зоны темно-каштановых и каштановых почв. Зона светло-каштановых и бурых почв полупустыни захватывает небольшой участок на востоке области (рис.2.3). Преобладающими по площади являются каштановые почвы (23 %) и черноземы (62 %), которые составляют основу пахотного земельного фонда области (Крыщенко и др., 2012; Безуглова, Хырхырова, 2008). В северной части преобладают южные черноземы тяжелого гранулометрического состава, которые сменяются обыкновенными черноземами на западе, в центре и на юге области.

Восток тяготеет к низкопродуктивным комплексам каштановых почв с солонцами. На севере процессы минерализации органического вещества протекают

медленнее, что способствует формированию темноокрашенного гумусового горизонта средней мощности. При продвижении на юг безморозный период становится короче, процессы минерализации происходят на всю глубину и не прекращаются практически весь год. В таких условиях формируется мощный гумусовый горизонт с невысоким содержанием гумуса в нем (Назаренко, Павлова, Соколова, 2022).

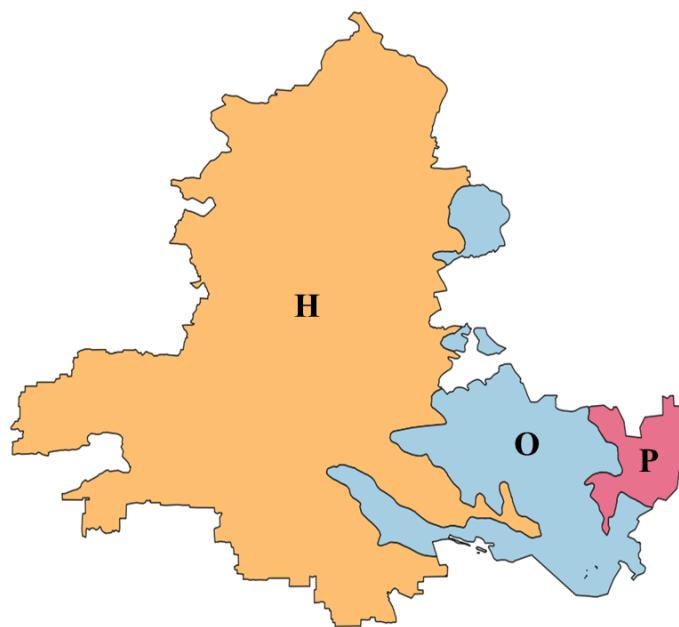


Рисунок 2.3 – Схема почвенно-экологического районирования Ростовской области. Н-Зона обыкновенных и южных чернозёмов степи, О-Зона тёмно-каштановых и каштановых почв сухой степи, Р-Зона светло-каштановых и бурых почв полупустыни

Площадь пашни в Ростовской области составляет 5,7 млн.га. В структуре посевных площадей зерновые культуры занимают более половины. Среднее содержание гумуса 3,1%, а важный лимитирующий фактор – обеспеченность подвижным фосфором (Безуглова, Назаренко, Ильинская, 2020).

На территории Южного федерального округа Росгидромет прогнозирует иссушение степей и расширение пустынь, что будет приводить к потере накопленного углерода вследствие снижения продуктивности растений (Третий оценочный доклад ..., 2022). Благодаря применению адаптационных мер пока наблюдается увеличение урожайности сельскохозяйственных культур. Тем не

менее, по мере усиления глобального потепления ожидается снижение эффективности адаптации регионов к изменениям климата (Третий оценочный доклад ..., 2022).

Таким образом, Московская и Ростовская области были выбраны как репрезентативные для контрастных агроклиматических условий. Их сравнение позволяет выявить общие и специфические закономерности секвестрации углерода в пахотных почвах на крайних точках исследуемого градиента.

2.2 Алгоритм формирования карт потенциала секвестрации почвенного углерода GSOCseq согласно методике ФАО ООН

2.2.1 Общие принципы создания карт секвестрации

Карты потенциала секвестрации почвенного углерода (далее – Карты) разрабатывались по стандартной методике, изложенной и позднее дополненной ФАО ООН (Peralta et al., 2022). Она рекомендована для пахотных и пастбищных земель, которые, согласно МГЭИК, включают пашню с многолетними и однолетними культурами (зерновые, масличные, овощи, корнеплоды и кормовые культуры, деревья и кустарники, фруктовые сады, виноградники и плантации, такие как какао, кофе, чай, масличная пальма, кокос, каучуковые деревья, бананы и др.), их сочетаниями с травами, пастбища и сенокосы. На данный момент модель неприменима для использования на песчаных, засоленных и заболоченных почвах, рисовых полях, торфяниках и водоно-болотных угодьях, а также почвах с запасами ПОУ более 200 тС/га, содержанием песка более 90% или электропроводностью более 4 дСм/м в слое 0–30 см.

Несмотря на реакцию почвенного органического углерода на изменения в управлении землепользованием и в более глубоких слоях, горизонт 0-30 см выбран в качестве стандарта, поскольку он наиболее отзывчив к таким изменениям, позволяет использовать Глобальную карту содержания почвенного углерода (GSOCmap) в качестве базовой линии, обеспечивает сопоставимость с национальными cadastrами парниковых газов и допускает валидацию моделей с использованием имеющихся данных, преимущественно полученных для этой

глубины (Global Soil Organic Carbon Sequestration Potential Map – SOCseq v.1.1.: technical report, 2022).

Создание Карт включает сбор входных данных, их извлечение и гармонизацию и собственно моделирование.

2.2.2 Гармонизация входных данных и алгоритм моделирования

Моделирование скоростей секвестрации углерода почвами проходит по сложной многоступенчатой схеме, которая изображена на рисунке 2.4.

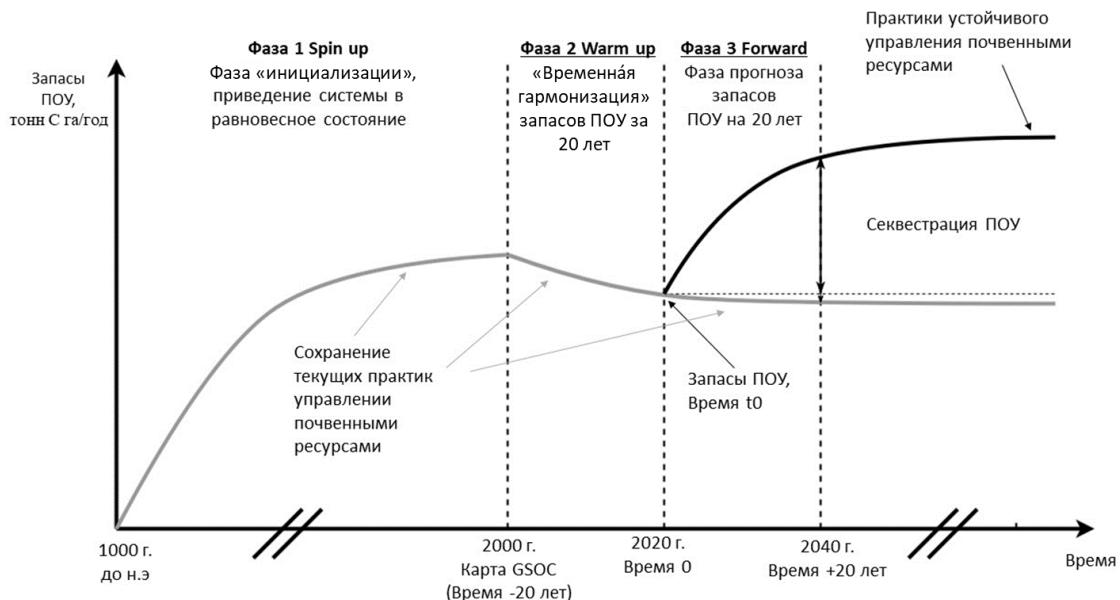


Рисунок 2.4 – Основные этапы при моделировании скорости секвестрации углерода почвами

Первые два этапа являются подготовительными, а собственно прогноз проводится на третьем этапе. Для работы рекомендовано использование углеродной модели RothC, принцип работы которой подробно описан в главе 1.6. Основная идея заключается в том, что на вход подается информация о поступающем в систему (почву) углероде, который распределяется моделью на несколько пулов с различными характеристиками устойчивости к разложению. Перераспределение ПОУ между пулами моделируется на основании информации о характеристиках почвы и климатических данных.

Первый этап – фаза инициализации (Spin up). Эта фаза является стандартной для всех моделей динамики ПОУ (Шеин и др., 2016). Ее задача – привести запасы

углерода в пулах к равновесному состоянию до достижения постоянной величины запасов органического углерода на 2000 г., соответствующей данным национальной карты запасов органического углерода в 30-сантиметровом слое почвы (Чернова и др., 2021). На вход подаются среднемноголетние климатические данные за 1981-2000 гг., количество поступающего углерода за этот период и почвенные характеристики. Начальное годовое поступление углерода с растительными остатками принимается равным 1 т С га/год. Период моделирования продолжается 500 лет при неизменных условиях.

Второй этап – «временная гармонизация» (Warm up). Задача – расчет запасов ПОУ в каждом пуле в нулевой момент времени (2020 г.) на основе фактических данных и запасов ПОУ в 2000 г. На вход подаются реальные погодные данные за 2001-2020 гг., количество поступающего углерода, рассчитанное согласно модели MIAMI по климату 1981-2000 гг., и почвенные характеристики.

Третий этап – фаза «прогноза» (Forward). Задача – оценка запасов почвенного углерода за период 2020-2040 гг. На вход подаются реальные погодные данные за 2001-2020 гг., почвенные характеристики и карты землепользования за 2020 г.

Таким образом, промежуточным результатом моделирования является временной ряд запаса ПОУ в каждом почвенном пуле с шагом в один месяц. Для формирования Карт необходим расчет запасов ПОУ при применении устойчивых практик земледелия и при традиционном хозяйствовании. Для этого на стадии *Forward* методикой предусмотрен прогноз запаса углерода согласно четырем сценариям: сохранение неизменных практик хозяйствования (CHX – сценарий неизменного хозяйствования) и три сценария с применением практик РИПР различной интенсивности: при приросте поступления органического вещества на 5% — (РИПР1), на 10% — (РИПР2) и на 20%— (РИПР3). Конкретные практики РИПР не рассматриваются, а сценарии считаются гипотетическими.

Скорость секвестрации является производной запасов углерода по времени первого порядка, то есть рассчитывается как изменение этого показателя во

времени. Различают абсолютную и относительную скорость секвестрации углерода.

Абсолютная секвестрация ($SOC_{seq\ abs}$) – это изменение запаса ПОУ относительно его значения в нулевой момент времени (2020 г.):

$$\Delta SOC_{abs} [\text{тC/га}] = SOC_{CHX}(t) - SOC(t_0) \quad (2.1)$$

Относительная секвестрация ($SOC_{seq\ rel}$) – разница между запасом SOC при сценариях РИПР и CHX:

$$\Delta SOC [\text{тC/га}] = SOC_{РИПР}(t) - SOC_{CHX}(t) \quad (2.2)$$

В нашей работе все выводы сделаны на основании абсолютной секвестрации почвенного углерода. Теоретически, в ходе анализа динамики запасов углерода текущую ситуацию можно отнести к одному из четырех случаев (рис.2.5):

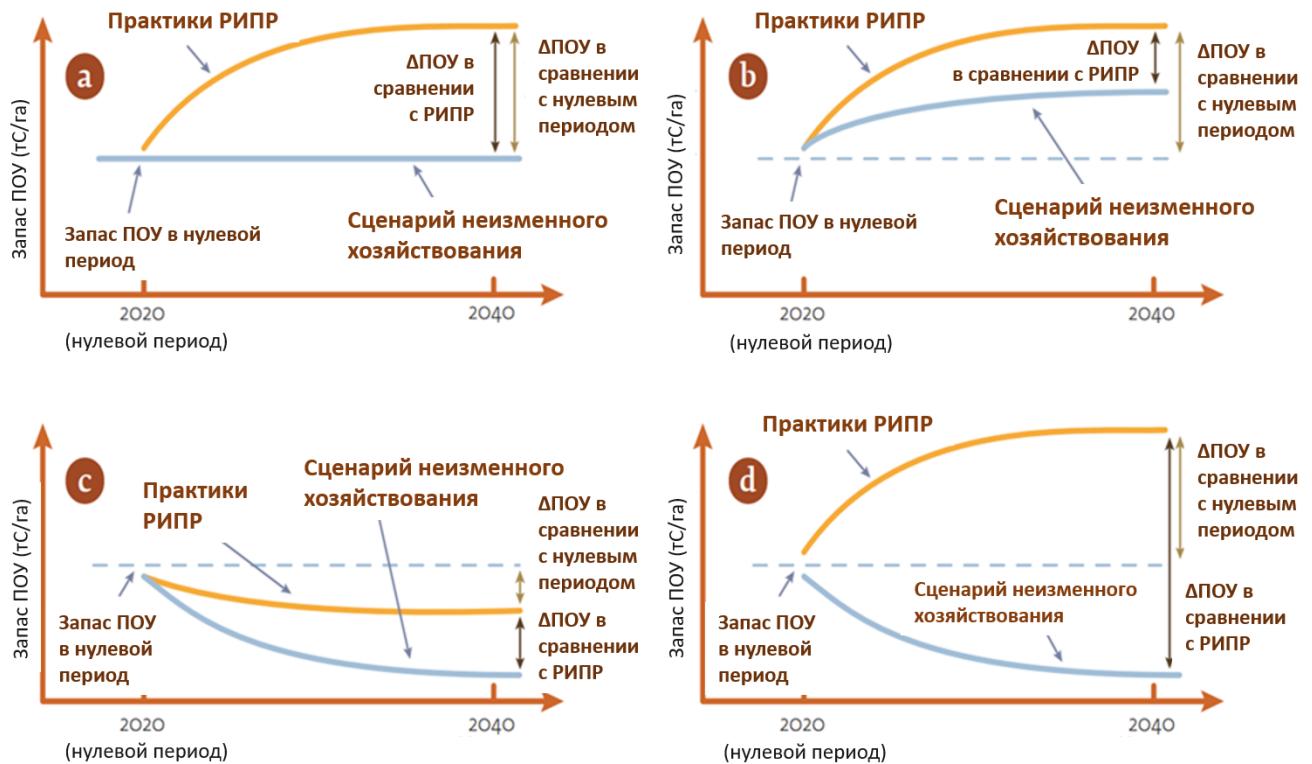


Рисунок 2.5 – Возможная наблюдаемая динамика изменения запасов ПОУ (Peralta et al., 2022)

В первом случае (а) мы приходим к выводу, что содержание органического углерода в почве достигло равновесия и не будет меняться при сохранении текущих технологий хозяйствования. Однако, применение углеродсберегающих практик поможет нам увеличить запасы ПОУ. Второй случай (б) говорит о том, что традиционные методы ведения земледелия и так способствуют закреплению углерода, но используя определенный менеджмент, мы можем увеличить его количественные показатели. Если же традиционный менеджмент способствует эмиссии углерода почвы, то новые технологии могут как снижать эту эмиссию (случай с), так и обращать эмиссию в секвестрацию (случай д).

2.2.3 Источники входных данных

Источниками входных данных являются открытые общедоступные базы и дополнительные материалы, которые были созданы отечественными учеными. Перечень входных данных указан в таблице 2.2.

Таблица 2.2

Входные данные, используемые для разработки Карт

Входные данные	Источник
<i>Климатические данные</i>	
Среднемесячная температура за 1981-2020 гг. (°C)	Общедоступная база данных Climate Research Unit (CRU) Ts4.0, 1 месяц, 50*50 км
Месячная сумма осадков за 1981-2020 гг. (мм)	Общедоступная база данных Climate Research Unit (CRU) Ts4.0, 1 месяц, 50*50 км
Месячная эвапотранспирация за 1981-2020 гг. (мм)	Общедоступная база данных Climate Research Unit (CRU) Ts4.0, 1 месяц, 50*50 км
Маска пахотных земель России с исключением заброшенных земель	Разработка отечественных исследователей по оригинальной методике (Кренке, 2020), 30м*30м
Ежемесячный растительный покров для расчета объемов поступающего углерода по NPP	Спутниковые снимки MODIS спутника Terra с информацией о значениях вегетационных индексов NDVI и EVI
Содержание фракции ила (частиц менее 0,002 мм) в слое 0-30 см	Коллекция карт свойств почв для всего мира SoilGrids250m версия 2.0 (Poggio et al., 2021), 1км*1км
Запасы углерода в слое 0-30 см на 2000 г.	Национальная карта запасов почвенного органического углерода на глубине 0-30 см (тонн С/га) (Чернова и др., 2021)

Климатические данные были взяты из общедоступной базы данных Отдела исследования климата Университета Восточной Англии Climate Research Unit (CRU) Ts4.0 (Harris et al., 2020). Они представляют собой ежедневные основные климатические показатели с 1901 г. в растровом формате, которые получены интерполяцией наблюдений общедоступной сети наземных метеорологических станций с разрешением $0,5^{\circ} \times 0,5^{\circ}$. Данные извлекались с точностью до ежемесячных значений, в одном растре находилось 120 каналов (10 лет по 12 месяцев).

При сравнении базы данных CRU с данными по метеостанциям Ростовской области по показателю среднегодовых значений температур общее расхождение не превышает 16% (Матвеев, 2022), что говорит о целесообразности использования информации глобального масштаба. В последней версии руководства по составлению Карт (Peralta et al., 2022) ФАО отдает предпочтение базе TerraClimate, так она создана как объединение баз WorldClim, CRU Ts4.0 и японской JRA55. Ранее автором проведен анализ чувствительности модели на источник климатической информации при замене на более подробную базу данных TerraClimate (Добровольская, Шабалина, Мешалкина, 2023а; Gorbacheva et al., 2024). Он показал, что происходит некоторое занижение скорости секвестрации, главным образом, из-за вклада отличий в сумме осадков за период 2001 – 2020 гг.

Источником маски пахотных земель России послужил продукт отечественных ученых, созданный объединением двух масок (Кренке, 2020). Первая маска была составлена для проекта глобальной продовольственной безопасности (Global Food Security-Support Analysis Data at 30 m, GFSAD30, 2023) и представляет собой карту полей, собранную путем анализа временных рядов снимков Landsat-8 за 3-4 года, данных радарной съемки и топографических индексов. Вторая маска используемых и застраивающих сельскохозяйственных земель извлечена как слой из Карты неиспользуемых сельхозземель, потенциально пригодных для выращивания леса (Глушков и др., 2019). Для выявления заброшенных земель была проанализирована динамика функционирования

вегетационных индексов и валовой первичной продуктивности: участки интенсивного сельскохозяйственного использования демонстрируют резкие её колебания. В конечном счете актуальная маска пахотных земель России представляла собой вероятностную карту доли пашни в каждом пикселе.

Для моделирования необходима информация не только о маске пахотных земель, но и о землепользовании (Land Use). Это необходимо для учета коэффициента распределения поступающих растительных остатков между пулами DPM и RPM. ФАО предлагает 13 классов использования (табл. 2.3).

Таблица 2.3

Классы использования земель согласно ФАО

№	Класс использования	Соотношение DPM/ RPM
1	Искусственные участки	-
2	Пахотные земли	1,44
3	Луга	0,67
4	Деревянная растительность	0,25
5	Кустарники	0,67
6	Травы	0,67
7	Мангровые леса	-
8	Скудная растительность	0,67
9	Голая почва	-
10	Снег и ледники	-
11	Водоемы	-
12	Пахотные земли- древесные культуры	1,44
13	Рисовые поля	1,44

По рекомендации ФАО при отсутствии подробных данных по умолчанию для всех территорий используется класс «пахотные земли».

Входные данные по содержанию частиц размером менее 0,002 мм были получены из обновляемой глобальной коллекции карт свойств почв SoilGrids разрешением 250 м, версия 2.0 (Poggio et al., 2021). Изначально она была разработана Международным справочно-информационным центром по почвам (International Soil Referenceand Information Centre, ISRIC) путем компиляции

национальных и региональных баз данных профилей почв. Так как коллекция карт содержит растровую информацию о содержании глины на глубинах 0, 5, 15 и 30 см, среднее содержание было получено как взвешенное среднее согласно уравнению:

$$\frac{1}{b-a} \int_a^b f(x)dx \approx \frac{1}{b-a} \frac{1}{2} \sum_{k=1}^{N-1} (x_{k+1} - x_k)(f(x_k) + f(x_{k+1})), \quad (2.3)$$

где N – количество взвешиваемых глубин, $a = 0$ см, $b = 30$ см, x_k – k -ая глубина (см), $f(x_k)$ – соответствующее этой глубине содержание глины.

Начальной точкой моделирования считается 2000 г., для которого в рамках проекта ФАО ООН создана Всемирная карта запасов органического углерода в 30-сантиметровом слое почвы (тонн С/га) (GSOCmap). Для нее отечественными экспертами была разработана соответствующая национальная карта (Чернова и др., 2021). На ее основе моделируется запас углерода на 2020 г. (время $t=0$) в рамках фазы «временной гармонизации» (Warm up), необходимый именно по причине отсутствия современных данных о запасах углерода на 2020 г.

Существует также вариант моделирования динамики углерода, для которого информация о запасах органического вещества получают из длительных экспериментов Географической сети длительных полевых опытов с удобрениями (Романенков и др., 2009; Romanenkov et al., 2019; Хусниев и др., 2023). В таких исследованиях получают хорошую сходимость экспериментальных и расчетных данных, они хорошо подходят для прогноза запаса углерода на территориях небольшого масштаба.

2.2.4 Путь вовлечения в модель данных о поступлении органического вещества

Одним из ключевых пакетов данных является информация о поступлении углерода в систему (почву). Она рассчитывается из предположения о пропорциональности количества органических остатков и NPP (Smith et al., 2005). Владея информацией об уровне чистой первичной продукции за каждый период

времени t и количестве поступивших органических остатков в нулевой период, можно рассчитать количество поступивших органических остатков в любой период:

$$C_t = \frac{C_{t-1} * NPP_t}{NPP_{t-1}}, \quad (2.4)$$

где C – поступление углерода в год.

В стандартных рекомендациях по созданию Карт рекомендован расчет NPP по модели MIAMI с использованием климатических и спутниковых данных (Modeling the primary productivity of the world, 1975). NPP определяется как минимально возможная продуктивность в заданных условиях температуры и увлажнения:

$$NPP_{MIAMI} [\text{г. сух. массы}/\text{м}^2 / \text{год}] = \min(NPP_T, NPP_P) \quad (2.5)$$

Предварительно проводится расчет отдельно по среднегодовой температуре и отдельно по годовой сумме осадков, выбирается наименьший из них:

$$NPP_T = \frac{3000}{1 + e^{1,315 - 0,119T}} \quad (2.6)$$

$$NPP_P = 3000 \times 1 - e^{-0,000664P} \quad (2.7)$$

где T – среднегодовая температура ($^{\circ}\text{C}$), P – годовая сумма осадков (мм).

Следующим этапом определяется длительность периода вегетации с использованием снимков MODIS спутника Terra с информацией о значениях вегетационных индексов NDVI и EVI. Информация извлекается с помощью скрипта в пространстве Google Earth Engine. Ставится порог по уровню NDVI для определения активности каждого поля (пикселя), который составляет 0.5 (Peralta et al., 2022).

Учет типа землепользования происходит путем умножения итогового NPP на коэффициент, который для пашни составляет 0,53 (Peralta et al., 2022). Затем показатель переводится в тC/га в год:

$$\begin{aligned} &NPP_{MIAMI} [\text{тC} \times \text{га}/\text{год}] \\ &= NPP_{MIAMI} [\text{г. сух. массы}/\text{м}^2 / \text{год}] \times 0,01 \times 0,48 \end{aligned} \quad (2.8)$$

Путь вовлечения в модель данных по продуктивности, в том числе использование для ее расчета климатических данных, схематично изображен на рис.2.6.



Рисунок 2.6 – Путь вовлечения в углеродную модель данных по климату и продуктивности

Из схемы видно, что климатические данные за 1981-2000 гг. используются для первой фазы моделирования, для второй фазы используются климатические данные за 2001-2020 гг., а также NPP, рассчитанный по климату годов 1981-2000. Непосредственно в фазе прогноза участвуют климатические данные за 2001-2020 гг. Основной вклад данных по продуктивности должен прослеживаться на второй фазе, когда рассчитывается запас ПОУ в пулах в нулевой момент времени (2020 г.) на основе данных о ежегодном поступлении органических остатков в почву.

2.2.5 Расчет доли неопределенности картографического исследования в результатах

Обязательной процедурой создания Карт является оценка неопределенности картографирования. Полная неопределенность при построении карт GSOCseq должна включать все источники: структурную неопределенность модели, неопределенность параметров модели и входных данных. Однако в качестве базового минимума принято рассчитывать только неопределенность входных данных.

Существуют различные методы оценки неопределенности в результатах. ФАО рекомендован расчет методом Монте-Карло (Peralta et al., 2022). Входные данные и значения параметров (влажность, содержание глины и т.д.) представляют в виде нормального распределения со средним значением, который равен значению параметра, и измеренному или заданному стандартному отклонению. Из данного распределения случайным образом выбирается значение 100 или более раз. Таким образом для каждого параметра получают средний модельный прогноз с 95% доверительным интервалом. Тогда можно посчитать относительную неопределенность как отношение половины ширины этого доверительного интервала к среднему значению параметра.

В нашем случае источниками неопределенности прогноза служат входные данные: температура – $\pm 2\%$, осадки – $\pm 5\%$, содержание глины – $\pm 10\%$, запасы углерода в слое 0 – 30 см – $\pm 20\%$, поступление углерода в почву для сценариев SSM – $\pm 15\%$.

2.3 Методика расчета чистой первичной продукции по данным Росстата на локальном уровне

Согласно техническому руководству ФАО, предпочтительным источником входных данных должны служить национальные базы, а обращение к глобальным рекомендуется при отсутствии первого источника (Peralta et al., 2022).

Для расчёта чистой первичной продукции пахотных почв широко используется методология, основанная в 70х годах 20-го века Ф.И. Левиным на пересчёте данных урожайности полевых культур в массу растительных остатков путем разработанных им регрессионных уравнений (Левин, 1977). Различные подходы к применению этой методологии заключаются в особенностях получения входной информации (полевые или статистические данные, расчет по валовому сбору или по урожайности), её обработки и консолидации (например, выбор учетных культур или усреднение по группам культур), а также наличие дополнительных операций (учет побочной продукции) и выбор коэффициентов пересчета (коэффициенты влажности растительных остатков и пересчета на углерод). Набор подобных особенностей складывает отдельную авторскую методику. Так, А.А. Романовской в 2008 году для балансовой оценки потоков углерода использована методология Ф.И. Левина с целью расчета выноса углерода с территории пахотных земель при уборке урожая на основании данных по валовому сбору (Романовская, 2008). Также в парадигме методологии Ф.И. Левина разработан расчет объема поглощений парниковых газов сельскохозяйственными угодьями как звено единой Методики количественного определения объема поглощений парниковых газов (приказ Минприроды России от 27.05.2022 № 371)».

В нашей работе разработан и использован альтернативный метод расчета NPP на базе национальных фактических данных, взятых из Базы данных статистических показателей, характеризующих состояние экономики и социальной сферы муниципального образования Росстата (БД ПМО). Она включает информацию по 19,7 тысячам муниципальных образований и доступна в открытом виде (Краткий методологический комментарий к БД ПМО, 2022).

Для расчета NPP необходимы ряды информации по двум показателям: «Посевные площади сельскохозяйственных культур» и «Урожайность сельскохозяйственных культур (в расчете на убранную площадь)». Подробная методика по извлечению данных и проводимых расчетах изложены в методических рекомендациях (см. Приложение 1).

Идея методики заключается в пересчете урожайности в биомассу растений по уравнениям регрессии. Использовалась модель, в которой надземная и подземная фитомасса является функцией от урожайности и типа выращиваемой культуры (Левин, 1977). Регрессионные уравнения перечислены в приложении 2. Данные уравнения апробированы современными исследованиями (Строков и др., 2023; Dobrovolskaya et al., 2024), а также лежат в основе расчета баланса углерода в почве, изложенном в Распоряжении Минприроды России от 30 июня 2017 г. № 20-р. Рядом специалистов в настоящее время проводятся работы по верификации и обновлению коэффициентов уравнений, что требует колоссального количества трудовых и временных ресурсов (Суховеева, 2022).

Методика состоит из трудоемких операций с таблицами большой размерности, поэтому расчеты проводились в модуле преобразования данных и подсистеме подготовки данных Power Query. Выгрузка таблиц за 2011-2020 гг. производилась в несколько шагов зачастую по периодам в 2-3 года с дальнейшим сведением в ручном режиме, так как структура посевных площадей меняется от года к году, что влечет за собой различную архитектуру таблиц за разный период. Около половины муниципальных образований (далее – МО) меняли свое наименование или объединялись. Поэтому на втором шаге такие МО были разделены на доноров и реципиентов и проведена работа по их объединению. Для расчетов брались данных для хозяйств всех категорий. На третьем шаге перечень МО сверялся с растровыми данными, то есть с перечнем МО карт, из таблиц удалялись территории со статусом «городской округ», так как расчет секвестрации не производится для городов. Вид промежуточной таблицы представлен на рисунке 2.7.

25	Пшеница яровая				
26	Муниципальный район				
27	Хозяйства всех категорий				9,8
28	Овес				
29	Муниципальный район				
30	Хозяйства всех категорий	6,25	7		4
31	Картофель				
32	Муниципальный район				
33	Хозяйства всех категорий	87,34	137,6		124,79
34	Овощи - всего				
35	Муниципальный район				
36	Хозяйства всех категорий	210,41	298,31		273,89

Рисунок 2.7 – Фрагмент промежуточной таблицы

Далее проводилась работа по сведению таблиц «Посевные площади...» и «Урожайность...», которую удалось частично автоматизировать, однако требовались финальные проверки, ручной поиск и исправление ошибок. Основные трудности заключались в несоответствии списка культур для различных МО. Ниже приведены примеры правил, исходя из которых была проведена данная работа:

- Исключение обобщающих категорий, которые являются суммой своих подкатегорий (например, категория «овощи – всего»).
- Объединение категорий по одному признаку (например, «многолетние травы» в таблице урожайности и «многолетние травы на сено», «многолетние травы на зеленый корм» в таблице площадей).
- Исключение культур с незначимо малыми площадями при отсутствии данных по урожайности, и наоборот.

Приведение культур в соответствие – это большая аналитическая работа, в которой исследователь должен понимать, как можно оптимизировать данные без потерь для дальнейшей работы.

Следующим шагом в аппарат вводился блок «словарь» с перечнем культур, для которых есть уравнения регрессии Ф.И. Левина, и параметров этих уравнений. Указанные уравнения опубликованы для 20 культур, поэтому категории культур из статистических данных должны были быть сведены к перечню из 20 пунктов. Для

культур, у которых отсутствовали данные по коэффициентам уравнения, были взяты коэффициенты для близких по фенотипу растений. Например, категория «помидоры» Росстата должна рассчитываться по параметрам категории «овощи» Левина. Стоит отметить, что параметры различаются в зависимости от урожайности культуры, что также требует учета в алгоритме.

Кроме того, для каждой культуры вручную проставлялся коэффициент влажности растительных остатков. Принято допущение, что влажность отмирающих растительных остатков составляла 17% для зерновых культур и 75% - для пропашных и прочих культур (РСТ РСФСР 384-83; Кабо и др., 2008). В результате блок «словарь» имел следующие столбцы (табл. 2.4).

Таблица 2.4

Перечень параметров блока «словарь» для одной культуры

Наименование столбца	Содержание
Росстат	Наименование культуры согласно БД ПМО
Левин	Наименование культуры для поиска регрессионного уравнения.
Влажность остатков, %	Принято допущение, что влажность растительных остатков составляет 17% для зерновых культур и 75% - для пропашных и прочих культур
Коэф влажности	Коэффициент пересчета в абсолютно сухую массу (для влажности 17% - 0,85, для влажности 75% - 0,57).
Пограничная урожайность	Если для культуры указано два регрессионных уравнения, то необходимо указать границу урожайности, при которой одно уравнение сменяется другим. Например, для озимой пшеницы это 25.
K1_low	Коэффициент при первом слагаемом для побочной продукции при урожайности ниже пограничной
B1_low	Коэффициент при втором слагаемом для побочной продукции при урожайности ниже пограничной
K2_low	Коэффициент при первом слагаемом для поверхностных остатков при урожайности ниже пограничной

Наименование столбца	Содержание
B2_low	Коэффициент при втором слагаемом для поверхностных остатков при урожайности ниже пограничной
K3_low	Коэффициент при первом слагаемом для корней при урожайности ниже пограничной
B3_low	Коэффициент при втором слагаемом для корней при урожайности ниже пограничной
K1_high	Коэффициент при первом слагаемом для побочной продукции при урожайности выше пограничной
B1_high	Коэффициент при втором слагаемом для побочной продукции при урожайности выше пограничной
K2_high	Коэффициент при первом слагаемом для поверхностных остатков при урожайности выше пограничной
B2_high	Коэффициент при втором слагаемом для поверхностных остатков при урожайности выше пограничной
K3_high	Коэффициент при первом слагаемом для корней при урожайности выше пограничной
B3_high	Коэффициент при втором слагаемом для корней при урожайности выше пограничной

Таким образом, данные были подготовлены для расчетов. Далее был необходим перевод данных в панельный формат (рис. 2.8), дальнейшие расчеты производились с помощью скриптов.

Рисунок 2.8 – Фрагмент таблицы в панельном виде для работы с большими данными

Перед расчетом также необходима импутация данных пустых ячеек, то есть их заполнение по определенным алгоритмам. В таком случае берется средняя площадь/урожайность за все десять лет. В качестве оценки среднего по годам в период с 2011 по 2020 гг. бралось медианное значение.

Собственно расчет поступления углерода из разных частей растения и сумма со всего растения основан на формуле 2.9:

$$C(t) = m(\text{ц/га}) * S(\text{га}) * \text{Коэф}_{\text{вл}} * 0,45 * 0,1 \quad (2.9)$$

где $C(m)$ – количество углерода в абсолютно сухих растительных остатках, $m(\text{ц/га})$ – масса растительных остатков (побочной продукции или поверхностных остатков или корней), вычисляется по регрессионному уравнению $Kx+B$, где x – восстановленная урожайность,

$S(\text{га})$ – посевная площадь (восстановленная),

$\text{Коэф}_{\text{вл}}$ – коэффициент пересчета на абсолютно-сухую массу,

0,45 – коэффициент пересчета растительных остатков на углерод,

0,1 – коэффициент пересчета в тонны.

Коэффициент пересчёта из сухих растительных остатков в углерод является общепринятым и составляет 0,45 (Семёнов, Ходжаева, 2006).

На третьем шаге информация об NPP (тC*га/год) переводилась в растровый формат и вводилась в процесс моделирования согласно вышеописанной схеме (рис. 2.3).

2.4 Принципы расчетов целевых значений 2 и 4 промилле

Расчет целевых значений «4 на 1000» и «2 на 1000» является задачей, которая отвечается после получения промежуточной карты запаса ПОУ в нулевой период (2000 г.) по результатам второй фазы моделирования - «временной гармонизации» (Warm up). Для этого рассчитывается соответствующая доля (0,004 и 0,002) запаса ПОУ в указанную дату. Полученная величина и будет являться целью ежегодной секвестрации углерода для компенсации его антропогенной эмиссии. С ней сравнивали прогнозные значения секвестрации и делали вывод о достижимости данных рубежей.

2.5 Расчет вариабельности запасов гумуса на примере полевых данных карбонового полигона Чашниково Московской области

Дополнительно в рамках работы проведен анализ неопределенности послойного полевого метода оценки запасов почвенного углерода из прикопок 0-30 см. Общая неопределенность может быть выражена в стандартном отклонении и складывается из нескольких источников: аналитический, вызванный пробоподготовкой и природной изменчивостью (Самсонова, 2008; Самсонова и др., 2023).

Общепринятый метод оценки запасов почвенного углерода состоит в расчете показателя по следующей формуле:

$$M \text{ (т/га)} = Cdvh, \quad (2.10)$$

где C – содержание почвенного углерода, %; dv – плотность сложения почвы, г/см³; h – мощность слоя, см.

При этом оценка каждого множителя несет в себе полный список источников неопределенности. Точность определения запасов углерода в почве на уровне

отдельного поля в значительной степени зависит от трех ключевых факторов: методики подготовки проб (просеивание, измельчение), объема анализируемой навески и применяемого метода анализа (Tirez et al., 2014). Неопределенность пробоподготовки вносит существенный вклад, поэтому выделена отдельно:

$$S_{\text{общ}}^2 = S_{\text{аналит}}^2 + S_{\text{пробоподг}}^2 + S_{\text{природн}}^2 \quad (2.11)$$

В подготовке пробы к анализу значительная доля варьирования значений будет определяться неопределенностью измерения плотности почвы. В работе определение плотности сложения проводилось путем отбора проб фиксированного объема. Сроки отбора проб приходились на сентябрь, поэтому исходили из предположения о квазиравновесном состоянии плотности сложения почвы после весенней вспашки.

Схема опробования имеет заметное значение при учете доли неопределенности, связанной с мощностью расчетного слоя (Самсонова и др., 2023). Если проба берется на всю его мощность, то она может характеризовать разные толщи описываемого слоя и давать заметный вклад в неопределенность. Особенно актуален такой вклад для почв с контрастными горизонтами. Этим можно пренебречь, когда пробы берутся послойно. В работе пробоотбор проводился на площадке 100×100 м в пяти прикопках. Пробы для определения плотности отбирались из центра слоев 0-10, 10-20, 20-30 см кольцевым буром объемом 100 см³. Пробы доводили до воздушно-сухого состояния, измельчили и просеивали через сито 2 мм. Затем из образцов отбирали крупные корни.

В тех же пробах проводили определение содержания углерода почвенного органического вещества методом Тюрина в модификации Никитина (нагрев в сушильном шкафу при 140°C вместо водяной бани) и Орлова-Гриндель (спектрофотометрическое окончание вместо титрометрического).

Эта же проба использовалась для дальнейшей оценки содержания углерода. Запас углерода рассчитывался суммированием его послойных значений. Результаты обрабатывали иерархическим дисперсионным анализом с тремя уровнями для плотности сложения и пятью – для содержания углерода.

ГЛАВА 3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ¹

3.1 Сравнительные скорости секвестрации углерода ряда областей Европейской территории России

3.1.1 Абсолютные скорости секвестрации для различных сценариев землепользования

В работе были смоделированы абсолютные скорости секвестрации объектов исследования (т С/га в год) для четырех сценариев использования почвенных ресурсов (табл. 3.1).

Таблица 3.1.

Абсолютная скорость секвестрации территориальных единиц для различных сценариев землепользования: CHX – сценарий неизменного хозяйствования, РИПР – сценарии рационального использования почвенных ресурсов по возрастанию интенсивности

		Абсолютная скорость секвестрации, т С/га в год			
		CHX	РИПР1	РИПР2	РИПР3
1	Новгородская область	0,069	0,073	0,086	0,113
2	Тверская область	0,099	0,101	0,115	0,142
3	Московская область (центральная часть)	0,066	0,085	0,103	0,135
4	Калужская область (север)	0,059	0,083	0,097	0,126
5	Брянская область (север)	0,035	0,075	0,091	0,126
6	Московская область (юг)	0,088	0,113	0,141	0,198
7	Калужская область (юг)	0,088	0,118	0,141	0,188
8	Тульская область (север)	0,108	0,145	0,177	0,237
9	Брянская область (юг)	0,062	0,101	0,125	0,172

¹ Основные результаты, изложенные в данном разделе, опубликованы в работах:

1. Добровольская В.А., Мешалкина Ю.Л., Горбачева А.Ю., Романенков В.А. Обновление карты потенциала секвестрации углерода пахотными почвами Московской и Тверской областей на основе данных РОССТАТА // Проблемы агрохимии и экологии. — 2025. — № 2. — С. 53–58. EDN: TEAALT Импакт-фактор 0,347 (РИНЦ).
2. Романенков В.А., Мешалкина Ю.Л., Горбачева А.Ю., Добровольская В.А., Кренке А.Н. Прогноз динамики запасов углерода в почвах возделываемых земель Европейской России в контексте стратегии низкоуглеродного развития // Известия Российской академии наук. Серия географическая. — 2023. — Т. 87, № 4. — С. 584-596. — DOI 10.31857/S2587556623040106. EDN: ZPYRTE. Импакт-фактор 1,519 (РИНЦ).
3. Самсонова В.П., Мешалкина Ю.Л., Добровольская В.А., Кондрашкина М.И., Дядькина С.Е., Филиппова О.И., Кротов Д.Г., Морозова Т.М., Красильников П.В. Исследование неопределенности оценок запасов органического углерода в масштабах угодий // Почвоведение. — 2023. — № 11. — С. 1437-1449. — DOI 10.31857/S0032180X23600725. EDN: YIXGMW. Импакт-фактор 2,766 (РИНЦ).

		Абсолютная скорость секвестрации, т С/га в год			
		СХХ	РИПР1	РИПР2	РИПР3
10	Московская область (самый юг)	0,150	0,187	0,240	0,342
11	Тульская область (юг)	0,148	0,202	0,256	0,362
12	Липецкая область	0,062	0,111	0,155	0,243
13	Воронежская область (север)	0,004	0,047	0,084	0,159
14	Белгородская область (север)	0,024	0,064	0,103	0,178
15	Воронежская область (юг)	-0,006	0,033	0,071	0,149
16	Белгородская область (юг)	-0,012	0,025	0,059	0,127
17	Ростовская область (запад)	-0,005	0,031	0,063	0,127
18	Ростовская область (с-в)	0,006	0,036	0,062	0,117
19	Ростовская область (ю-в)	-0,009	0,029	0,053	0,106
20	Ростовская область (в)	-0,011	0,022	0,042	0,084

При сценарии неизменного хозяйствования наибольшее поглощение углерода (от 0,100 т С/га в год) в среднем можно ожидать от Тульской и юга Московской области. Это соответствует переходу от зоны серых лесных почв лиственных лесов к зоне оподзоленных, выщелоченных и типичных черноземов и серых лесных почв лесостепи. Эмиссия углерода наблюдается на всех почвах зоны обыкновенных и южных черноземов степи и захватывает зону темно-каштановых и каштановых почв сухой степи на юго-востоке Ростовской области.

При сценариях РИПР высокие темпы секвестрации углерода начинают распространяться на север и юг и захватывают все больше территории в зоне серых лесных почв лиственных лесов. Значения варьируют от 0,025 до 0,202 т С/га в год для сценария РИПР1, от 0,053 до 0,256 т С/га в год – для РИПР2, от 0,106 до 0,362 т С/га в год – для РИПР3. Минимальные значения всегда характерны для юго-востока Ростовской области, а максимальные - для юга Тульской области.

Зависимость скоростей секвестрации углерода от зоны почвенно-экологического районирования наглядно представлена в таблице 3.2. Общая закономерность может быть сформулирована следующим образом. Наибольшая скорость секвестрации присуща почвам зоны серых лесных почв лиственных

лесов, тогда как в зонах обыкновенных и южных черноземов степи, темно-каштановых и каштановых почв сухой степи наблюдается эмиссия углерода и околонулевые значения, а зоны дерново-подзолистых почв южной тайги и оподзоленных, выщелоченных и типичных черноземов и серых лесных почв лесостепи показывают промежуточные темпы поглощения углерода.

Сравнение с ранее полученными нами данными (Романенков и др., 2023; Романенков и др., 2024) показывают точное совпадение в тенденциях, однако в силу ограниченности рассматриваемых в данной работе территорий абсолютные показатели имеют незначительные отличия. Наиболее близкие оценки получены для зоны оподзоленных, выщелоченных и типичных черноземов и серых лесных почв лесостепи (расхождение не более 0,01 т С/га в год).

Таблица 3.2.
Абсолютная скорость секвестрации углерода почвами (т С/га в год)
согласно зонам почвенно-экологического районирования

Зона почвенно-экологического районирования	Сценарии			
	СНХ	РИПР1	РИПР2	РИПР3
Дерново-подзолистых почв южной тайги	0,066	0,083	0,098	0,128
Серых лесных почв лиственных лесов	0,099	0,133	0,165	0,228
Оподзоленных, выщелоченных и типичных черноземов и серых лесных почв лесостепи	0,060	0,106	0,149	0,236
Обыкновенных и южных черноземов степи	-0,008	0,030	0,064	0,134
Темно-каштановых и каштановых почв сухой степи	-0,002	0,032	0,058	0,111

При продвижении на север оценки скорости секвестрации оказываются выше, чем в ранней работе, при продвижении на юг – ниже. Последнее при этом оказывает такой эффект, что в ранних оценках зоны обыкновенных и южных черноземов степи и темно-каштановых и каштановых почв сухой степи по сценарию СНХ считались поглотителями углерода, а в текущей работе категорированы как поглотители.

Темпы наращивания скорости секвестрации углерода с переходом к технологиям рационального земледелия также неодинаковы для почвенных зон:

наибольший отклик показывает зона оподзоленных, выщелоченных и типичных черноземов и серых лесных почв лесостепи, наименьший – зона дерново-подзолистых почв южной тайги (табл. 3.2). Тем не менее, абсолютно для всех почв характерно увеличение закрепления углерода с интенсификацией рационального использования почвенных ресурсов (рис. 3.1).

По данным отечественных исследователей, наибольший углеродсеквестрирующий потенциал характерен для серых лесных почв и составляет около 30 000 кгС/га, а наименьший относят к черноземам – менее 5 000 кгС/га (Когут, 2020). Подобные данные хорошо согласуются с выводами текущей работы.

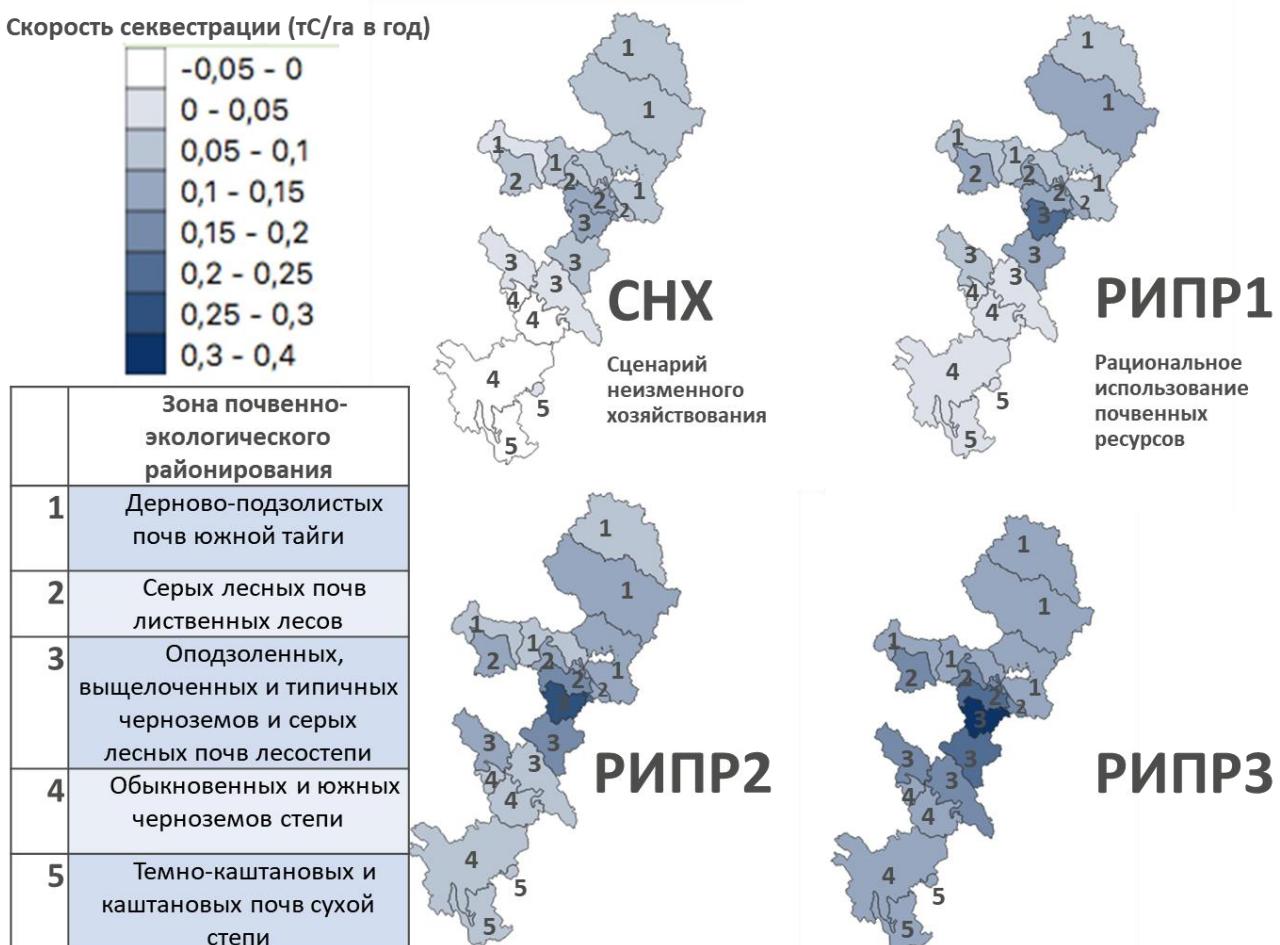


Рисунок 3.1 – Увеличение скорости секвестрации углерода с переходом от сценария неизменного хозяйствования к технологиям рационального земледелия (РИПР)

При анализе результатов моделирования стоит обратить внимание на тот факт, что в применяемой для расчетов модели отношение разлагаемого органического материала (DPM) и материала стабильного, устойчивого к разложению (RPM), для всех почв одинаково и составляет 1,44. То есть тип почв и природа стабилизации углерода не учитывается при моделировании. Тем не менее, в случае черноземных почв имеет место явление многообразия механизмов стабилизации органического вещества, не сходящихся исключительно на образовании органо-минеральных комплексов. Предполагается, что присутствуют также другие пути, которые делают значительный вклад в объемы депонирования углерода (образование агрегатов, окклюдирование и т.д.). Этот факт подтверждается данными о превышении в черноземах содержания органического углерода над углеродпротекторной емкостью, которая рассчитывается по гранулометрическому составу и, соответственно, дает оценку именно механизму образования органо-минеральных комплексов (Когут и др., 2020). Можно предположить, что в нашей работе по этой же причине может быть недооценен потенциал черноземов к секвестрации углерода.

Все районы зоны дерново-подзолистых почв южной тайги (Тверская, Новгородская, Калужская область и север Московской и Брянской областей) оказываются наименее чувствительны к добавлению органического вещества. Это ставит большой вопрос о целесообразности внедрения углеродсбрегающих практик в указанной зоне и обращает внимание на необходимость дополнительных изысканий в данных регионах.

У всех почв, обладающих оклонулевой или даже отрицательной скоростью секвестрации при сценарии неизменного хозяйствования (Белгородская, Воронежская, Ростовская области), применение мер сохранения углерода приводит к тому, что эмиссия сменяется его поглощением. Несмотря на относительно небольшой рост скорости секвестрации при продвижении от сценария СНХ к РИПРЗ, такие почвы в конечном итоге могут показать значения закрепления 100-150 кг С/га в год.

В целом по динамике изменения средней абсолютной скорости секвестрации исследованные почвы можно разделить на 3 группы (рисунок 3.2). Первая характеризуется ощутимой прибавкой скорости, производная которой заметно меняется при переходе от стратегии РИПР2 к РИПР3 (юг Тульской и Московской, Липецкая область). Во второй группе почвы достаточно сдержанно реагировали на добавление органического вещества, они принадлежали северным территориям (Тверская, север Московской и Новгородская область). Остальные почвы были отнесены к группе 3, где отклик наблюдался, и прирост скорости был довольно равномерным.

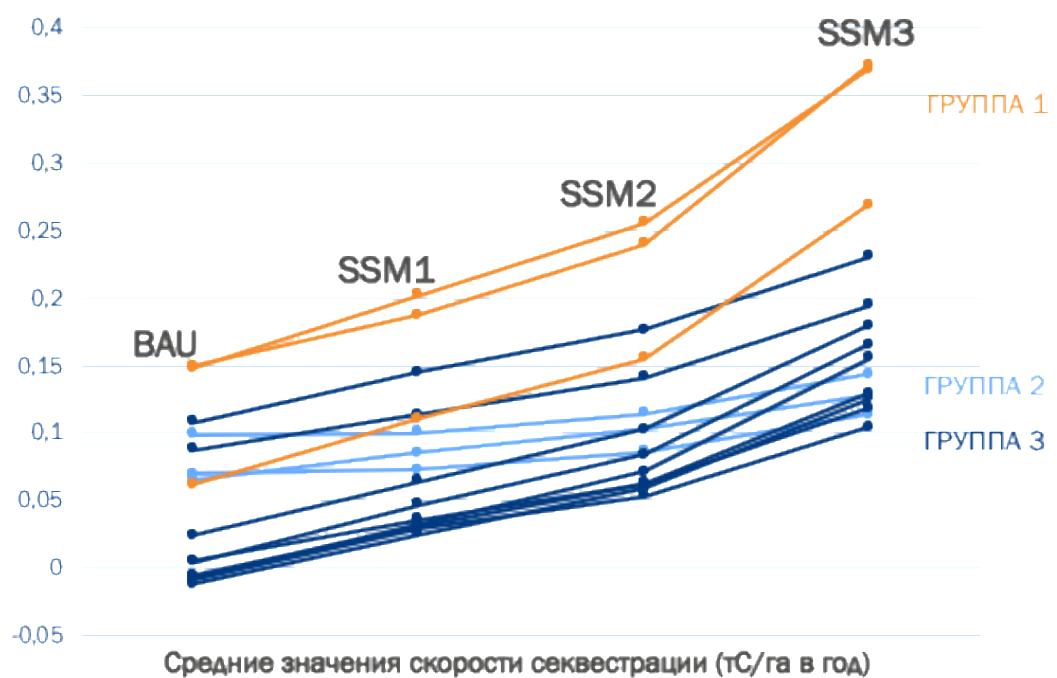


Рисунок 3.2 – Динамика изменения средних значений скорости секвестрации

Таким образом, моделирование подтвердило прямую зависимость скорости секвестрации углерода от почвенно-климатической зоны и сценария землепользования, показав наибольшую эффективность мер в лесостепных регионах. Несмотря на возможную недооценку потенциала черноземов из-за особенностей модели, переход к рациональному земледелию способен трансформировать почвы из источников углерода в его стоки. Полученные результаты подчеркивают важность дифференциированного подхода к внедрению углеродсберегающих практик с учетом региональной специфики.

3.1.2 Возможность достижения глобальной цели «4 на 1000» и ее национальной альтернативы

Прогнозные скорости секвестрации могут быть сопоставлены с необходимыми для достижения глобальной цели «4 на 1000» и ее национальной альтернативы «2 на 1000».

На рисунке 3.3 синим пунктиром обозначены цели, достижение которых рассчитано исходя из идеи парижской инициативы «4 на 1000». Соответствующие целевые уровни скорости секвестрации адаптированной национальной цели «2 на 1000» проиллюстрированы оранжевым пунктиром. Гистограмма показывает прогноз скоростей секвестрации для зон почвенно-экологического районирования (от Е до О). Интенсивность практик рационального землепользования обозначена цветом от голубого (СНХ) до синего (РИПР3).

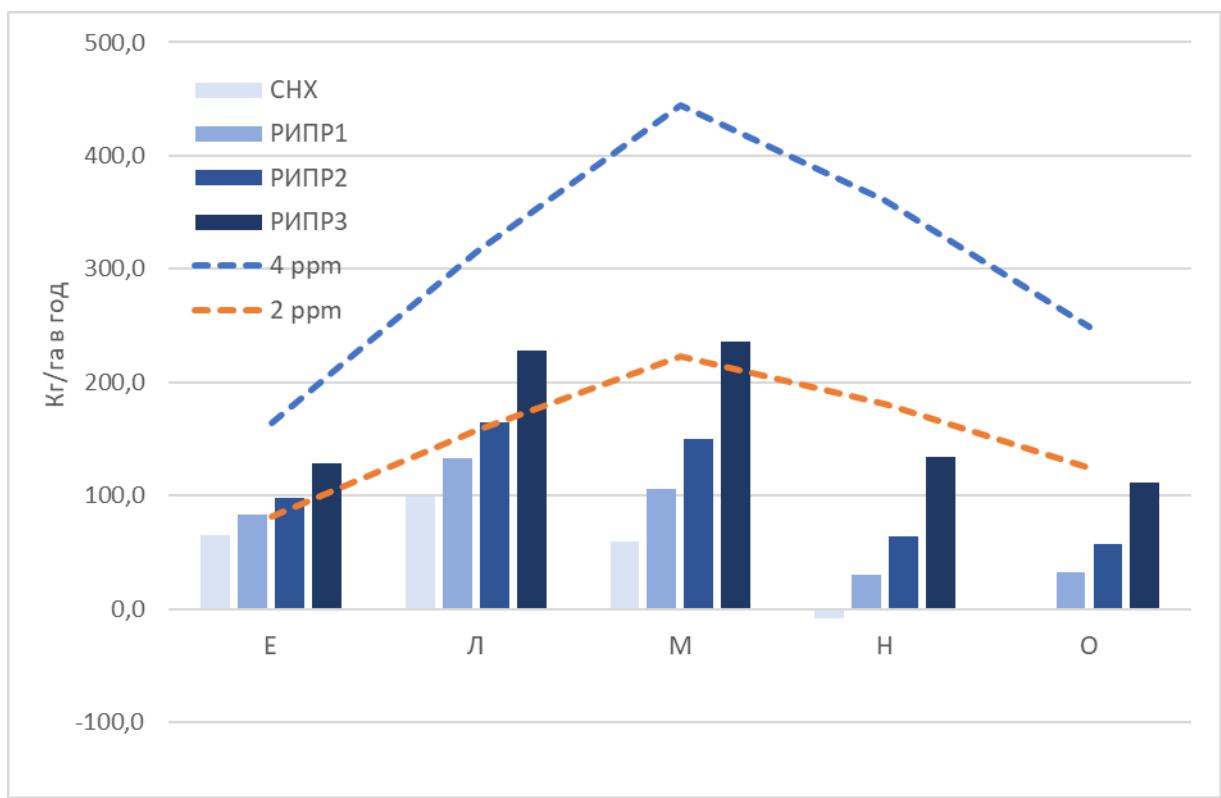


Рисунок 3.3 – Прогноз абсолютных скоростей секвестрации и целевые уровни инициатив «4 на 1000» и «2 на 1000». Е – зона дерново-подзолистых почв южной тайги; Л – зона серых лесных почв лиственных лесов; М – зона оподзоленных, выщелоченных и типичных черноземов и серых лесных почв лесостепи; Н – зона

обыкновенных и южных черноземов степи; О - темно-каштановых и каштановых почв сухой степи

Результаты говорят о том, что цели глобальной инициативы «4 на 1000» не могут быть достигнуты ни на одной из рассмотренных областей Европейской территории России вне зависимости от сценария применения углерод сберегающих практик. Цель «2 промилле» может реализоваться для зоны дерново-подзолистых почв южной тайги, для зоны серых лесных почв лиственных лесов и для зоны оподзоленных, выщелоченных и типичных черноземов и серых лесных почв лесостепи при увеличении поступления органических остатков на 5%, 10% и 20%, соответственно. Почвы зон обыкновенных и южных черноземов степи и темно-каштановых и каштановых почв сухой степи не смогут оправдать ожиданий в объемах секвестрации углерода даже при наиболее интенсивном сценарии.

Наши результаты коррелируют с особенностью процесса секвестрации, на которую обращает внимание ФАО: предел секвестрирования углерода минеральных почв гораздо выше, чем у почв, богатых органическим веществом (FAO, 2020; Six et al., 2002).

Таким образом, максимальная скорость секвестрации углерода будет наблюдаться в серых лесных почвах лиственных лесов. Внедрение технологий, направленных на сохранение углерода, доказало свою эффективность для всех исследуемых регионов и способствует повышению его поглощения, включая территории, которые в настоящее время являются чистыми эмитентами. Почвы Европейской части России не обладают потенциалом для достижения глобальной инициативы «4 промилле». В то же время, адаптированная национальная цель в «2 промилле» может быть реализована на дерново-подзолистых и серых лесных почвах при условии применения углеродосберегающих практик различной интенсивности.

3.1.3 Неопределенность расчетов для зонального ряда

Неопределенность расчетов для зонального ряда

В работе в качестве входных данных о содержании углерода в почвах использовалась Всемирная карта запасов органического углерода в 30-санитметровом слое почвы (GSOCmap). В этом случае расчет неопределенности сводится к использованию метода Монте-Карло. Медиана расширенной неопределенности оценок скорости секвестрации углерода десяти областей Европейской территории России для сценария неизменного хозяйствования составляет 14,7%, значения варьируются от минимума в точке 11,9% до максимума в точке 20,1%. Нижний quartиль равен 14,5%, верхний – 14,7%. Для сценариев рационального использования почвенных ресурсов медиана составила 15,5%, значения варьируются от минимума в точке 12,1% до максимума в точке 22,6%. Нижний quartиль равен 15,3%, верхний – 15,9%.

Составляющие неопределенности расчетов на примере Московской области

Расчет показал, что медиана расширенной неопределенности оценок скорости секвестрации углерода для Московской области составляет 14,1% для базовой технологии землепользования и 15,4% для технологий рационального использования почвенных ресурсов (табл.3.3).

Распределение неопределенности картографирования для сценария СНХ варьируется от 13,0% до 14,9%, нижний и верхний quartиль составляют 13,5% и 14,3%. Для сценариев РИПР минимум и максимум находятся в точках 14,5% и 16,9%, а нижний и верхний quartиль – 15,1% и 16,0%.

Наглядно видно, что, добавив дополнительный фактор неопределенности в модель в этих случаях (дополнительное поступление углерода в систему), мы получили небольшой рост неопределенности результата.

Усредненные значения расширенной неопределенности (%) оценок скорости секвестрации углерода в Московской области, полученных с помощью только моделирования и с помощью сочетания методов моделирования и полевого пробоотбора

	СНХ	РИПР1	РИПР2	РИПР3
Только моделирование	14,1	15,4	15,4	15,4
Моделирование + пробоотбор	18,5	19,5	19,5	19,5
- из нее – только пробоотбор	12,0	12,0	12,0	12,0

Если в исследованиях вместо готовой карты запасов углерода перейти на натурные полевые данные о запасах углерода, выполненных в соответствии с методом Тюрина, то необходимо дополнительно учитывать вклад пробоотбора в общую расширенную неопределенность. Причем, он будет складываться из неопределенности определения плотности сложения и содержания углерода. Так, оказалось, что для карбонового полигона Чашниково плотность увеличивалась с глубиной, однако по результатам иерархического дисперсионного анализа эта тенденция оказалась статистически незначимой. Кроме того, при статистической обработке данных зафиксированы отскоки значений в хвостах распределения, которые могут быть связаны с попаданием дернины в пробу (в области низких значений) или осколков каменистого материала (в области высоких значений). Для нивелирования вклада таких отскоков было проведено винзорирование, то есть замена таких значений по определенному алгоритму. В результате заключили, что ни глубина, ни расположение точки пробоотбора значимо не влияет на значение плотности, поэтому варьирование может быть сведено к случайным факторам. Общее среднее для плотности сложения составило 1,31 г/см³.

Напротив, при обработке результатов содержания углерода в пробах выявилось влияние расположения точки пробоотбора по глубине и по местоположению точки на участке. Также получили значительную дисперсию,

связанную с фактором пробоподготовки, а на случайные факторы пришлась меньшая доля дисперсии. Среднее содержание углерода составило 1,48%.

В результате расширенная неопределенность при использовании метода прикопок будет составлять 12,0%. Неопределенность расчетов при переходе на полевые данные вырастет для сценария СНХ до 18,5%, а для сценариев РИПР до 19,5%.

Составляющие неопределенности расчетов на примере Ростовской области

В Ростовской области даны оценки расширенной неопределенности при расчетах на базе картографической информации путем метода Монте-Карло. Медиана неопределенности оценок скорости секвестрации составляет 14,9% для сценария неизменного хозяйствования и 16,0% для технологий рационального использования почвенных ресурсов.

Распределение неопределенности картографирования для сценария СНХ варьируется от 14,6% до 15,8%, нижний и верхний quartиль составляют 14,9% и 15,0%. Для сценариев РИПР минимум и максимум находятся в точках 15,4% и 17,8%, а нижний и верхний quartиль – 15,9% и 16,2%.

3.2 ОЦЕНКА ЧИСТОЙ ПЕРВИЧНОЙ ПРОДУКЦИИ НА ОСНОВЕ СТАТИСТИЧЕСКИХ ДАННЫХ

3.2.1 Чистая первичная продукция на основе локальных статистических данных для Московской области

Первым делом были получены значения NPP, включенные в модель при традиционной методике прогнозирования ФАО по климатическим данным (рис. 3.4). Как видно из рисунка, значения NPP меняются постепенно и, скорее всего, в этом случае прогноз NPP иллюстрирует климатический потенциал региона. Значения NPP возрастают с северо-востока на юго-запад и не учитывает реальное плодородие почв.

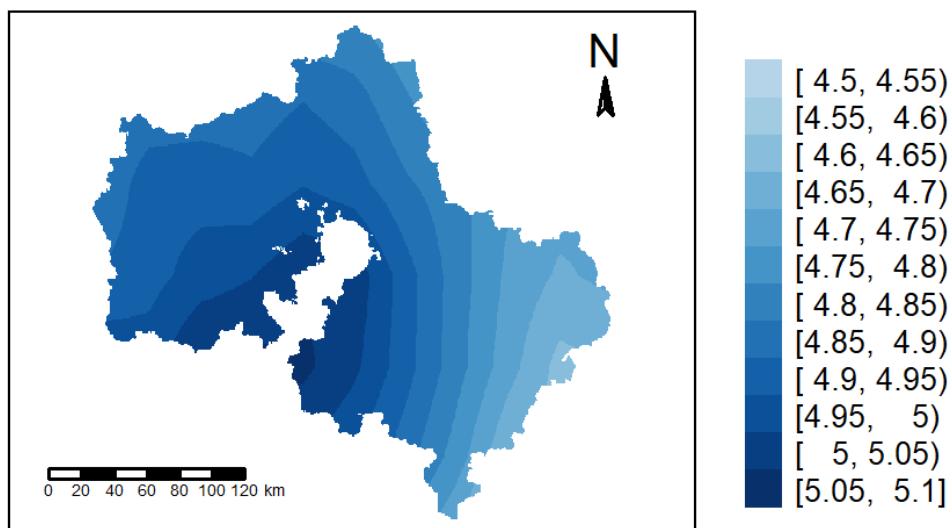


Рисунок 3.4 – Чистая первичная продукция Московской области (NPP, т С/га в год) по методике ФАО

Медианное значение для всей области составляет 4,90 т С/га в год, разброс значений варьирует от 4,63 до 5,06 т С/га в год. Распределение данных отлично от нормального, и может быть охарактеризовано квартилями: первый – 4,81 т С/га в год, третий – 4,95 т С/га в год (рис. 3.5).

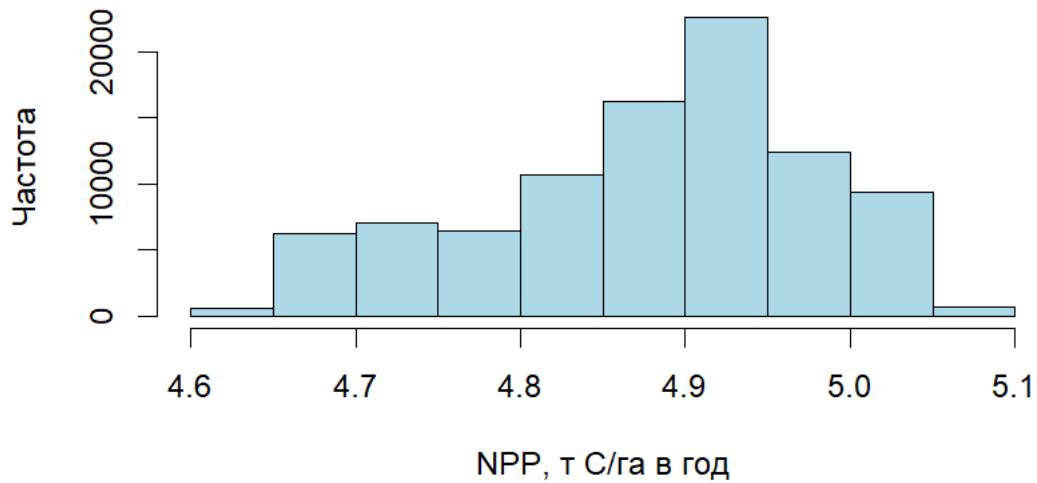


Рисунок 3.5 – Гистограмма распределения чистой первичной продукции Московской области по методике ФАО (NPP, т С/га в год)

Для расчетов с использованием статистической информации была подготовлена база данных, которая представляла собой два блока таблиц: 7037 строк в блоке «Посевные площади...» и 8341 строка в блоке «Урожайность...», – содержащих информацию по 33 муниципальным образованиям Московской области. Анализ исходной информации по группам культур показал, что структура посевных площадей в основном приходится на сочетание зерновых, картофеля и трав (рис. 3.6).

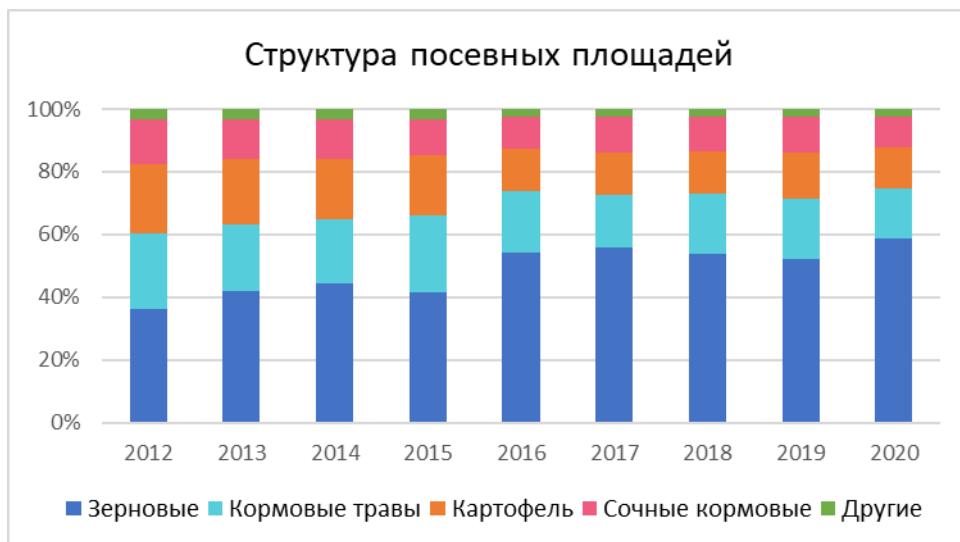


Рисунок 3.6 – Структура посевных площадей Московской области, сгруппированная по группам культур

Картограмма данных по NPP Московской области, уточненная на основании статистических данных Росстата до масштаба муниципальных образований представлена на рисунке 3.7.

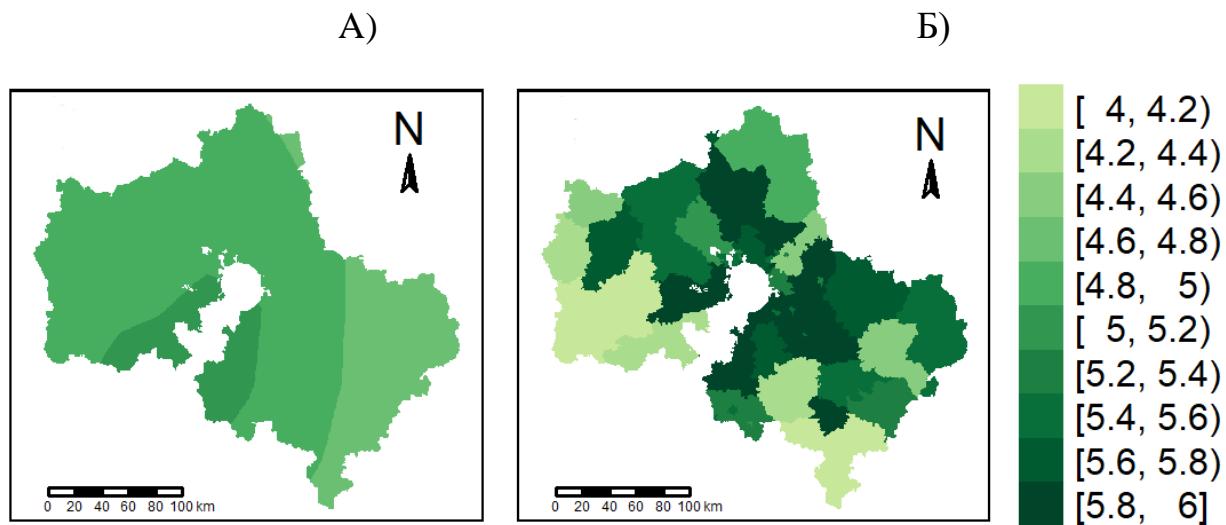


Рисунок 3.7 – Чистая первичная продукция Московской области (NPP, т С/га в год) по статистическим данным согласно административному делению (А) по методике ФАО и (Б) с использованием данных Росстата

При обращении к статистическим данным Росстата оказалось, что медианное значение для всей области составляет 5,40 т С/га в год. NPP оказался в среднем выше на 1,50 т С/га в год, то есть продуктивность полей выше, чем можно было бы ожидать по глобальной климатической модели. При этом сильно увеличился разброс значений; значения варьируют от 3,48 т С/га в год до 8,70 т С/га в год и перераспределяются в соответствии с особенностями каждого района (рис. 3.8). Распределение данных также отлично от нормального, первый quartиль – 4,43 т С/га в год, третий – 5,75 т С/га в год.

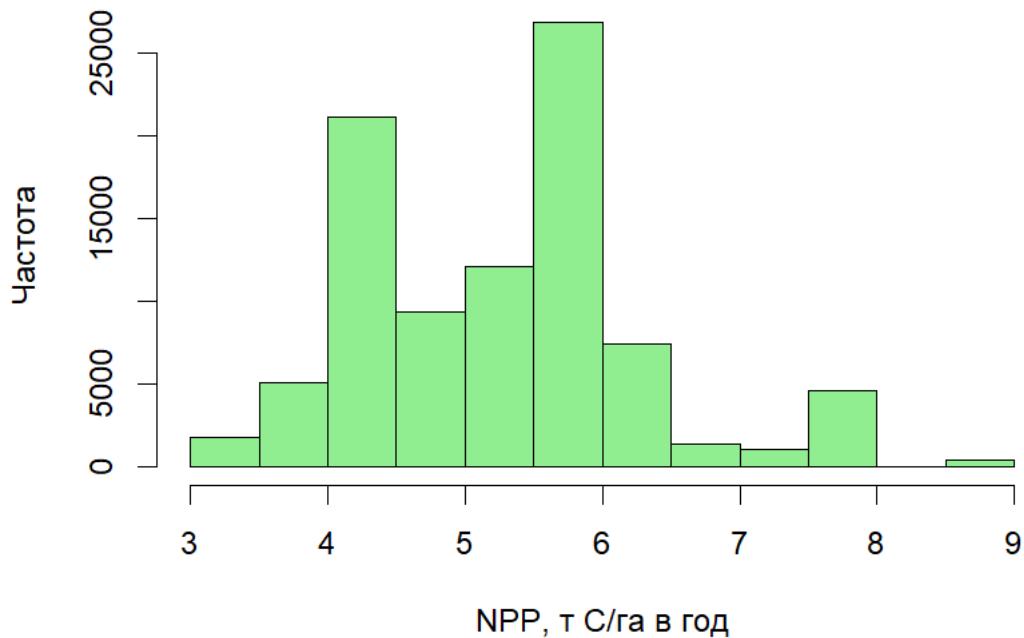


Рисунок 3.8 – Гистограмма распределения чистой первичной продукции Московской области по статистическим данным (NPP, т С/га в год)

Разница в объемах продукции по районам приведена в приложении № 3 и проиллюстрирована на рисунке 3.9. Результаты моделирования по Московской области с использованием глобальных климатических данных показывают высокую продуктивность на юге региона. Реальная карта интенсивности сельскохозяйственного производства соответствует распределению уровней NPP, полученных по статистическим данным. Для районов получены оценки, большие в среднем на 0,44 т С/га в год. Наибольшие значения NPP отмечаются в Озерском, Дмитровском и Ленинском районах (7,2; 7,5 и 8,7 т С/га в год, соответственно). Наименьшие значения NPP были выявлены для Серебряно-Прудского, Зарайского и Рузского районов (3,5; 3,6 и 3,6 т С/га в год, соответственно). При иллюстрации этих данных видно (рис. 3.8), что районы на юго-западе области не реализовывают свой природно-климатический потенциал, так как по методике ФАО их продуктивность выше, чем по данным Росстата.

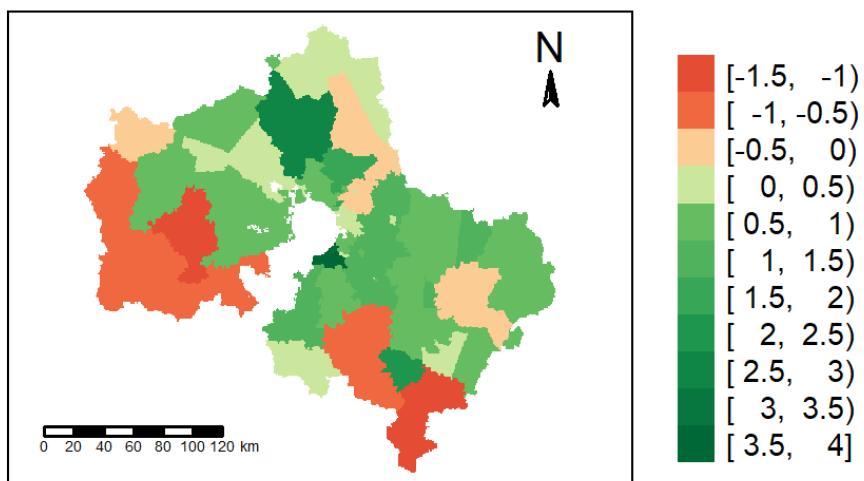


Рисунок 3.9 – Разность между значениями чистой первичной продукции Московской области (NPP, т С/га в год), полученными по статистическим данным и по методике ФАО

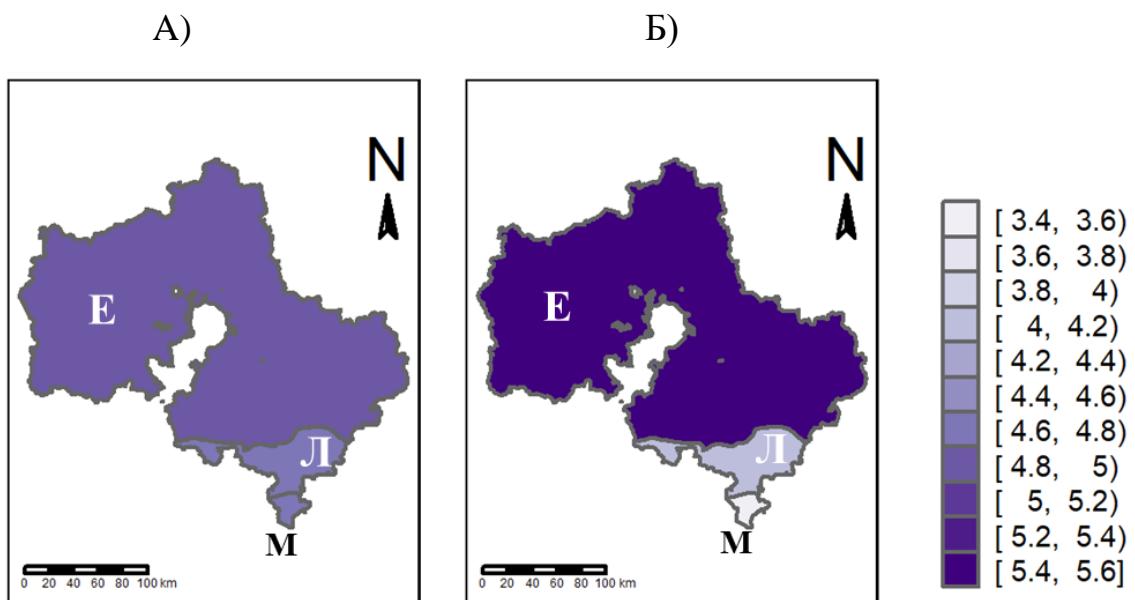


Рисунок 3.10 – Чистая первичная продукция Московской области (NPP, т С/га в год) по статистическим данным согласно почвенно-экологическим зонам (А) по методике ФАО и (Б) с использованием данных Росстата. Е - зона дерново-подзолистых почв южной тайги, Л – зона серых лесных почв лиственных лесов, М – зона оподзоленных, выщелоченных и типичных черноземов и серых лесных почв лесостепи

Результаты прогноза продуктивности по зонам на основе двух методик представлены на рисунке 3.10 и подтверждают вышеописанные результаты о росте

разброса значений при использовании статистических данных. При этом динамика NPP изменяется по-разному в зависимости от принадлежности к почвенно-экологической зоне. Наблюдается рост медианных значений продуктивности в зоне дерново-подзолистых почв южной тайги с 4,90 до 5,40 т С/га в год. Для двух других зон прогнозируется снижение в среднем этого показателя: с 4,75 до 3,48 т С/га в год для зоны оподзоленных, выщелоченных и типичных черноземов и серых лесных почв лесостепи; с 4,79 до 4,02 т С/га в год для зоны серых лесных почв лиственных лесов.

Таким образом, в среднем оценки на основе статистических данных показали более низкие значения продуктивности пахотных почв Московской области, чем при оценке, основанной на климатических данных. Однако, на уровне районов этот эффект проявляется неравномерно. Наблюдается большой разброс значений от 3,48 до 8,70 т С/га в год. Районы на юго-западе области не реализуют свой потенциал в полной мере в среднем на 0,8 т С/га в год, а почвы на северо-востоке показывают продуктивность выше, чем прогнозируется методикой ФАО, в среднем на 1,0 т С/га в год.

3.2.2 Чистая первичная продукция на основе локальных статистических данных для Ростовской области

Значения продуктивности почв Ростовской области, полученные по традиционной методике прогнозирования ФАО по глобальным данным представлены на рисунке 3.11. Как и для Московской области, прогноз NPP иллюстрирует климатический потенциал региона. Значения продуктивности изменяются плавно с запада на восток без учета особенностей каждого района. Медианное значение для всей области составляет 4,03 т С/га в год, разброс значений варьирует от 3,05 на востоке области до 4,89 т С/га в год на юго-западе.

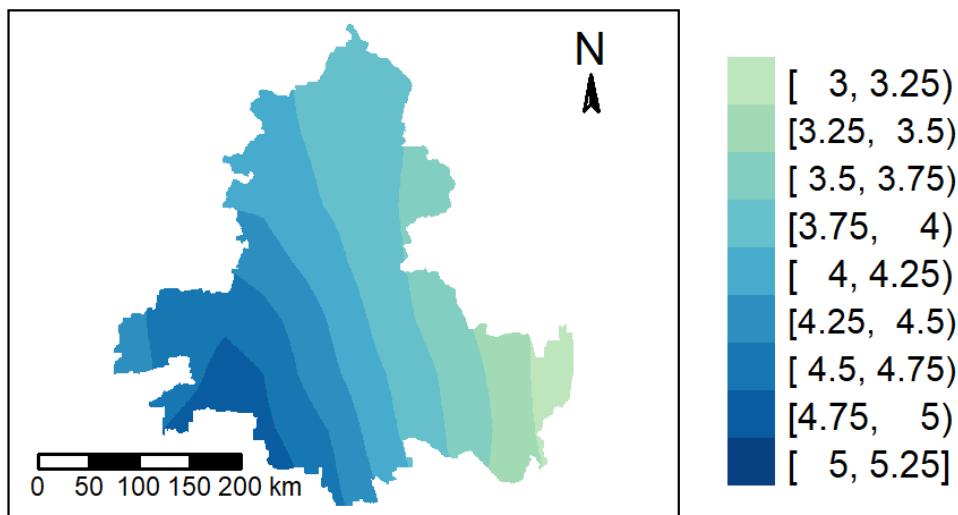


Рисунок 3.11 – Чистая первичная продукция Ростовской области (NPP, т С/га в год) по методике ФАО

Распределение данных отлично от нормального, первый quartиль составляет 4,80 т С/га в год, третий – 4,42 т С/га в год (рис. 3.12).

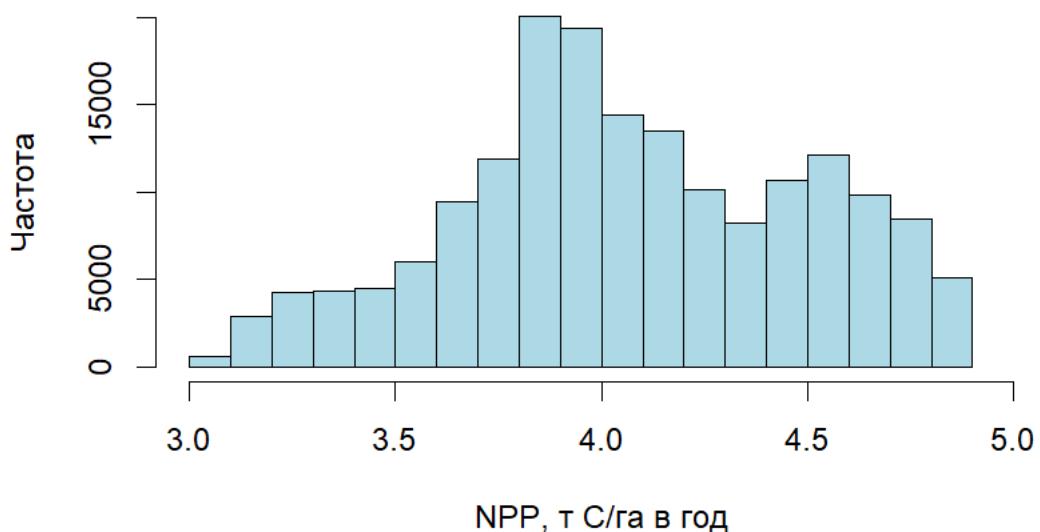


Рисунок 3.12 – Гистограмма распределения чистой первичной продукции Ростовской области по методике ФАО (NPP, т С/га в год)

База данных с исходной статистической информацией представляла собой два блока таблиц: 6781 строка в блоке «Посевные площади...» и 7627 строк в блоке «Урожайность...», – содержащих информацию по 43 муниципальным

образованиям Ростовской области. Основные посевные площади приходятся на зерновые (в основном, пшеница озимая) и масличные (подсолнечник) (рис. 3.13).



Рисунок 3.13 – Структура посевных площадей Ростовской области, сгруппированная по группам культур

После проведения расчетов NPP на основе локальных статистических данных сравнили полученные прогнозы согласно административному делению (рис. 3.14).

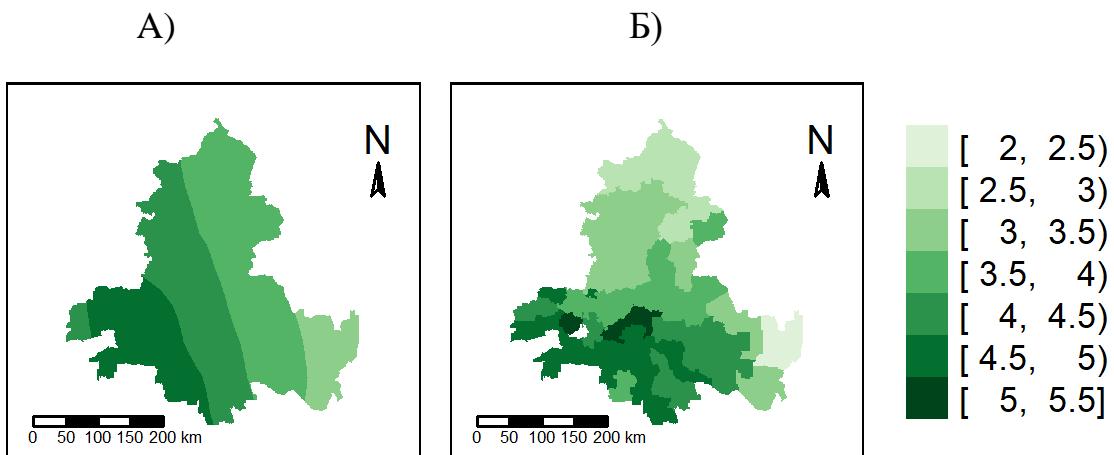


Рисунок 3.14 – Чистая первичная продукция Ростовской области (NPP, т С/га в год) по статистическим данным согласно административному делению (А) по методике ФАО и (Б) с использованием данных Росстата

Очевидно, что при обращении к локальным данным климатический потенциал области перераспределяется в зависимости от особенностей каждого района. Медианное значение чистой первичной продукции к 3,58 т С/га в год при использовании локальных данных, что свидетельствует о снижении оценки

продуктивности по сравнению ожиданиями на основе климатических данных. Также зафиксировано увеличение разброса значений: минимум составляет 2,02 т С/га в год, максимум – 5,16 т С/га в год. Распределение данных также отлично от нормального, характеризуется квартилями: первый – 4,43 т С/га в год, третий – 5,75 т С/га в год (рис. 3.15).

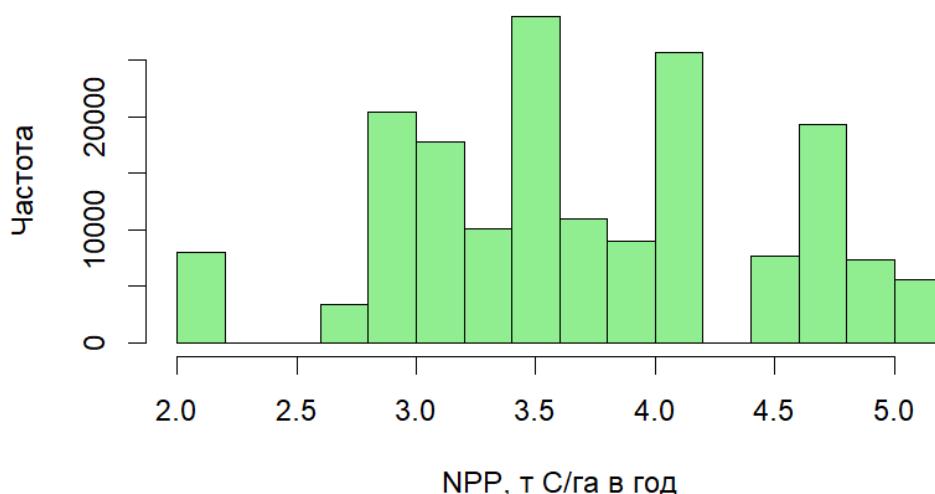


Рисунок 3.15 – Гистограмма распределения чистой первичной продукции Ростовской области по статистическим данным (NPP, т С/га в год)

Разница в объемах продукции по районам приведена в приложении № 4 и проиллюстрирована на рисунке 3.16. Общая закономерность снижения количества поступающего углерода с запада на восток осталась актуальной, но в каждом районе проявилась по-разному. Оказалось, что на южных черноземах накапливается меньше растительных остатков, чем предполагалось ранее, а на обычновенных – больше. В среднем для района фактические данные дают нам снижение в NPP в размере 0,33 кг С/га в год.

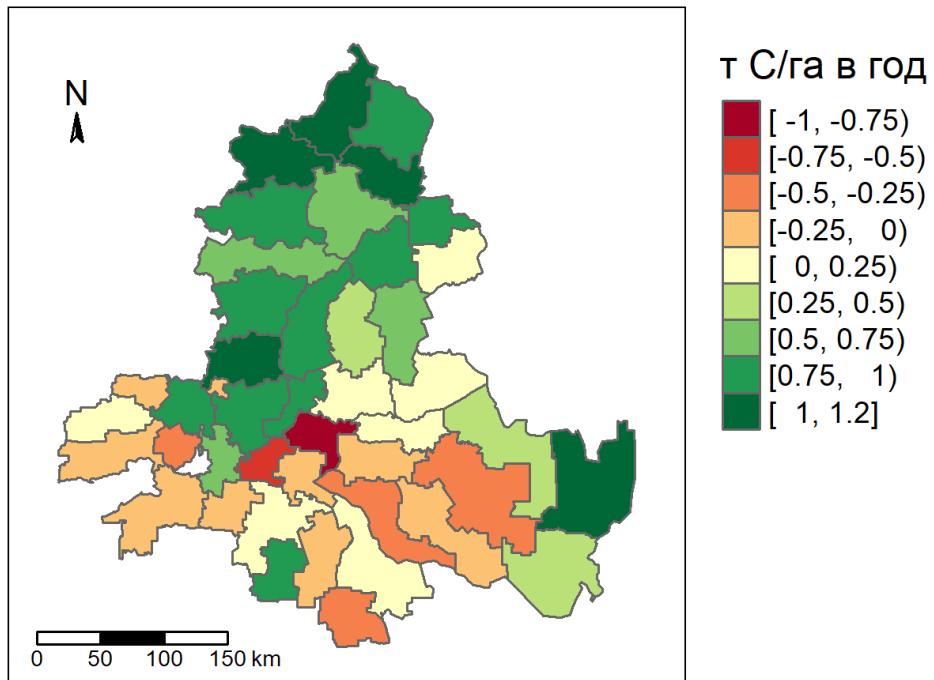


Рисунок 3.16 – Разность между значениями чистой первичной продукции Ростовской области (NPP, т С/га в год), полученными по статистическим данным и по методике ФАО (вычитали из оценок по методике ФАО оценки по статистическим данным)

Максимум продуктивности наблюдается в Багаевском, Мясниковском и Семикаракорском районах (5,16; 5,09 и 5,06 т С/га в год, соответственно), минимум – в Заветинском, Боковском и Верхнедонском (2,02; 2,67 и 2,85 т С/га в год, соответственно).

При иллюстрации этих данных видно (рис. 3.16), что в основном северные районы не реализовывают свой природно-климатический потенциал, так как по методике ФАО их продуктивность выше, чем по данным Росстата.

Прогнозные значения по чистой первичной продукции также были проанализированы согласно почвенно-экологическим зонам (рис. 3.17).

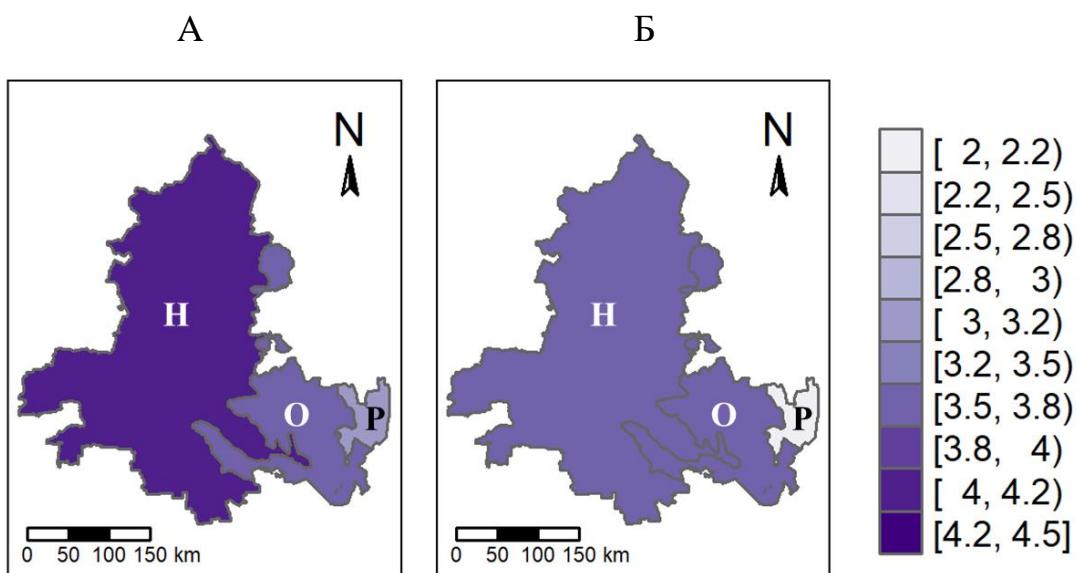


Рисунок 3.17 – Чистая первичная продукция (NPP, т С/га в год) (А) по методике ФАО и (Б) по статистическим данным согласно почвенно-экологическим зонам. Н-Зона обыкновенных и южных чернозёмов степи, О-Зона тёмно-каштановых и каштановых почв сухой степи, Р-Зона светло-каштановых и бурых почв полупустыни

Оказалось, что максимум продуктивности характерен для зоны (Н) обыкновенных и южных чернозёмов степи, что осталось справедливым и при использовании альтернативной методики расчета продуктивности. Для этой зоны медианное значение составило 4,17 т С/га в год при использовании глобальных данных и 3,63 т С/га в год – при использовании локальных. Разброс значений ожидаемо увеличился с 5,59 – 4,89 т С/га в год при использовании методики ФАО до 2,67 – 5,16 т С/га в год при использовании альтернативной методики. Для зоны (О) тёмно-каштановых и каштановых почв сухой степи медианные значения составили 3,62 и 3,54 т С/га в год для методик ФАО и альтернативной, соответственно. Разброс значений увеличился с 3,17 – 4,35 т С/га в год при использовании методики ФАО до 2,02 – 4,63 т С/га в год. Для зоны (Р) светло-каштановых и бурых почв полупустыни медианные значения составили 3,19 и 2,02 т С/га в год для методик ФАО и альтернативной, соответственно. Разброс значений увеличился с 3,05 – 3,39 т С/га в год при использовании методики ФАО до 2,02 – 3,11 т С/га в год.

Таким образом, обе методики расчета чистой первичной продукции дали оценки, говорящие о снижении продуктивности при продвижении с юго-запада на северо-восток Ростовской области. Однако, при обращении к статистическим данным оказалось очевидно, что районы производят углерод с разной интенсивностью, которая не имеет строго соответствия с природно-климатическим потенциалом. Южные черноземы в реальности не реализуют этот потенциал в полной мере, в то время как обыкновенные черноземы показывают уровень продукции выше ожиданий, прогнозируемых по методике ФАО.

3.2.3 Обсуждение результатов, полученных по чистой первичной продукции

Чистая первичная продукция наземных экосистем (NPP) обычно оценивается по годовому приросту биомассы растений. Чтобы определить ее величину за сезон вегетации на конкретном поле, в конце этого сезона все растения, находящиеся на учетных площадках известной площади, удаляют и взвешивают. Необходимо также учесть подземную биомассу. По отношению сельскохозяйственным культурам она будет равной суммарной биомассе собранной товарной и нетоварной (соломы, ботвы) продукции, а также пожнивных и корневых остатков. Провести наземные измерения на всех сельскохозяйственных полях невозможно. В данном исследовании мы использовали оценки, основанные на урожайности посевных культур для каждого района и посевным площадям за период в 10 лет. Применение регрессионных уравнений пересчета урожая в биомассу сельскохозяйственных культур представляется более корректным по сравнению с использованием модели на основе климатических параметров. Хотя динамические углеродные модели используются в основном как инструмент для фундаментальных исследований, они все чаще применяются и в национальных масштабах для целей инвентаризации почвенного углерода и парниковых газов в почве. Подобный подход позволяет перейти к *третьему* уровню оценки изменений запасов почвенного углерода согласно Руководящим принципам национальных инвентаризаций МГЭИК (IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, 2006), давая возможность совершенствования инвентаризационных подходов.

Включение в модель независимых данных по уточнению потока входящего углерода по поступающим растительным остаткам относит такую оценку к третьему уровню точности.

Оценки NPP для обеих рассмотренных областей, полученные нами на основе статистических данных БД ПМО, оказались отличными от прогнозов по глобальным базам данных. Московская область в среднем показала более высокий уровень продуктивности (больше на 1,50 т С/га в год). Для Ростовской области наблюдалось, напротив, снижение чистой первичной продукции на 0,52 т С/га в год. Это говорит о том, что на практике потенциал продуктивности в этой области не реализован в полной мере.

Была проанализирована информация о продуктивности с полей, занятых различными культурами (табл. 3.4). Косвенным образом это может служить свидетельством адекватности результатов. Так, наибольшую продуктивность показывают овощи, картофель и кукуруза на силос в Московской области, картофель и сахарная свекла – в Ростовской области.

Таблица 3.4

Чистая первичная продукция пахотных почв Московской и Ростовской областей по списку культур Ф.И.Левина (NPP, т С/га)

Культура	Московская область	Ростовская область
Овощи	9,83	4,37
Кукуруза на силос	7,18	4,00
Картофель	7,03	6,13
Однолетние травы	5,82	3,51
Многолетние травы	5,69	1,57
Кормовые корнеплоды	5,26	5,01
Пшеница озимая	4,36	4,92
Кукуруза на зерно	3,82	3,25
Рожь озимая	3,55	2,87
Овес	3,16	2,44
Гречиха	2,27	1,58
Горох	2,26	1,66

Культура	Московская область	Ростовская область
Пшеница яровая	1,54	3,01
Лен	1,42	2,39
Ячмень яровой	0,98	2,97
Подсолнечник	-	2,29
Просо	-	2,45
Сахарная свекла	-	11,84
Ячмень озимый	-	4,25

Благодаря большой протяженности объекта исследования стало возможно рассмотреть полный ряд почвенных зон от дерново-подзолистых почв южной тайги до светло-каштановых и бурых почв полупустыни. Результаты моделирования по методике ФАО говорят о том, что при продвижении с северо-запада на юго-восток Русской равнины чистая первичная продукция планомерно снижается (табл. 3.5). Моделирование на национальных статистических данных также сохраняет подобную тенденцию, так для черноземной зоны и примыкающих к ней темно-каштановых почв получили близкие значения.

Полученная новая оценка чистой первичной продукции показала, что сдвиг значений неравномерный и разнонаправленный от зоны к зоне. Это выявляет целесообразность продолжения исследований с расширением охвата изучаемых территорий.

Таблица 3.5

Чистая первичная продукция пахотных почв Московской и Ростовской областей (NPP, т С/га в год)

Зона почвенно-экологического районирования	Методика ФАО	Использование локальных данных
Е Зона дерново-подзолистых почв южной тайги	4,90	5,40
Л Зона серых лесных почв лиственных лесов	4,79	4,02
М Зона оподзоленных, выщелоченных и типичных черноземов и серых лесных почв лесостепи	4,75	3,48

Зона почвенно-экологического районирования	Методика ФАО	Использование локальных данных
Н Зона обыкновенных и южных чернозёмов степи	4,17	3,64
О Зона тёмно-каштановых и каштановых почв сухой степи	3,62	3,54
Р Зона светло-каштановых и бурых почв полупустыни	3,19	2,02

Таким образом, получены медианные значения чистой первичной продукции, основанные на глобальных базах данных (4,90 т С/га в год для Московской области и 4,03 т С/га в год для Ростовской области), а также на национальных базах данных (5,40 т С/га в год для Московской области и 3,58 т С/га в год для Ростовской области). Расчёты по методике ФАО показывают равномерное снижение количества поступающего углерода в почву с юго-запада на северо-восток и отражают климатический потенциал исследуемой области. Обращение к национальной статистике перераспределяет поступающий углерод неравномерно между районами. Там, где происходит переоценка в положительную сторону, климатический потенциал можно считать недооцененным. В Московской области максимум зафиксирован в Озерском районе (7,23 т С/га в год), в Ростовской области – в Багаевском районе (5,16 т С/га в год). Где же изменение методики дает нам меньшие значения продуктивности, климатический потенциал реализован на практике не до конца.

3.3 Оценка скорости секвестрации углерода на основе статистических данных

3.3.1 Оценка скорости секвестрации углерода для Московской области

Для Московской области были оценены скорости секвестрации в слое 0-30 см по традиционной методике ФАО и с использованием данных Росстата при сохранении существующих агротехнологий – для сценария CHX. Прогнозные медианные значения, полученные по традиционной методике ФАО, достигли 0,09 т С/га в год для сценария CHX. Распределение полученных значений секвестрации отлично от нормального, и варьирует от 0,01 до 0,25 т С/га в год (рис. 3.18). Первый квартиль отмечен на значении 0,05 т С/га в год, третий – 0,11 т С/га в год. Это говорит нам о том, что уровень поглощения углерода почвами при неизменном хозяйствовании ничтожно мал, близок к нулю.

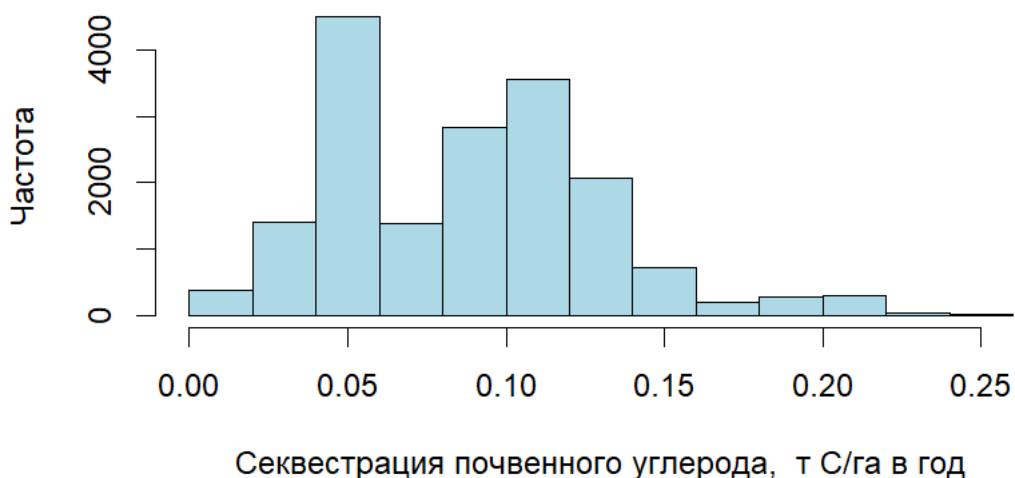


Рисунок 3.18 – Гистограмма распределения скорости секвестрации Московской области, рассчитанной по методике ФАО (т С/га в год)

Использование при моделировании NPP данных Росстата позволило получить другие оценки скорости секвестрации почвенного углерода пахотными почвами. Для сценария CHX значение выросло до 0,31 т С/га в год, что на 0,22 т С/га в год выше, чем при традиционных методах оценки (Добровольская и др., 2025). Это дает возможность однозначно определить Московскую область в разряд областей-поглотителей углерода.

При этом существенно вырос разброс значений (рис. 3.19). Данные растянулись от минимума в точке 0,02 до максимум в точке 1,45 т С/га в год. Первый quartиль составляет 0,19 т С/га в год, третий – 0,50 т С/га в год. По новым оценкам оказалось, что больше 62% значений превышают максимум, полученный по методике ФАО.

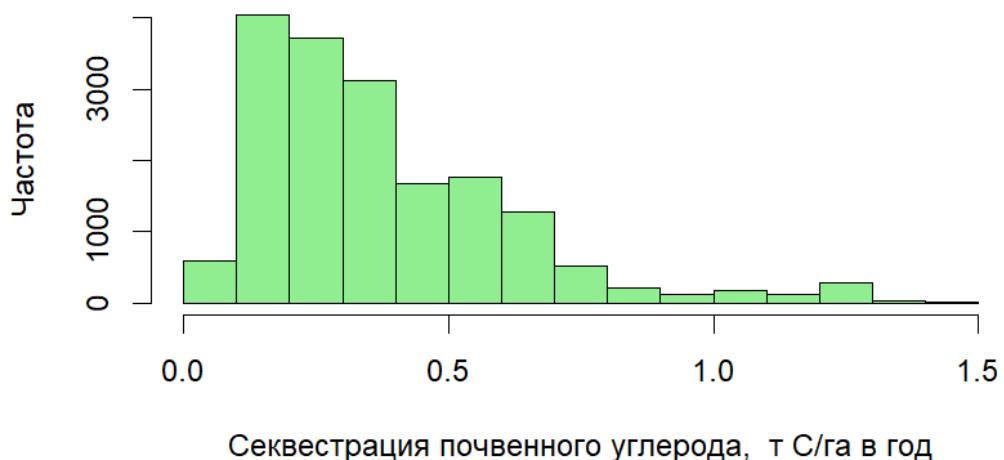


Рисунок 3.19 – Гистограмма распределения скорости секвестрации Московской области, рассчитанной по статистическим данным (т С/га в год)

Для сравнения данных, полученных для двух методик, построили распределение скоростей секвестрации (рис. 3.20).

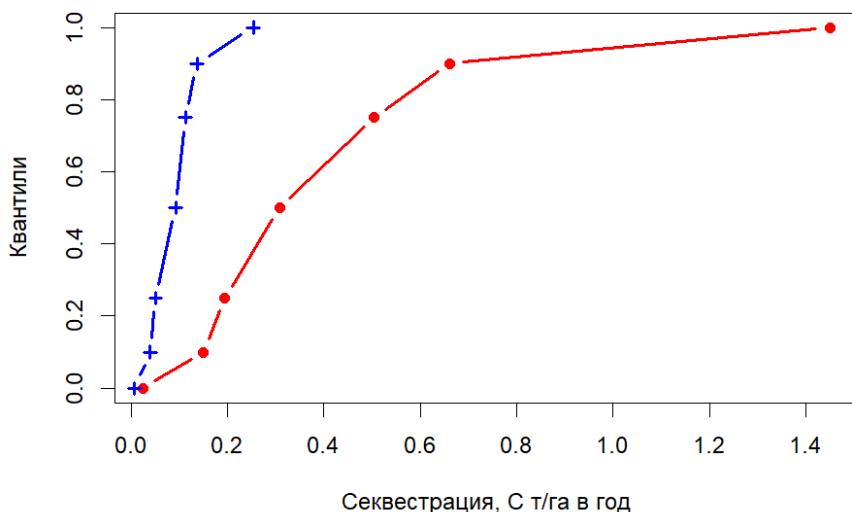


Рисунок 3.20 – Квантильное распределение значений скоростей секвестрации по территории Московской области, рассчитанное по методике ФАО (синяя линия, крестик) и по локальным данным (красная линия, кружок)

Оказалось, что при использовании локальных данных значительно увеличивается разброс значений, медианное значение сдвигается вправо на 0,216 т С/га в год.

Скорость секвестрации углерода почвами (т С/га в год) по сценарию CHX по административному делению, рассчитанная по двум методикам, представлена в приложении №5 и на рисунке 3.21.

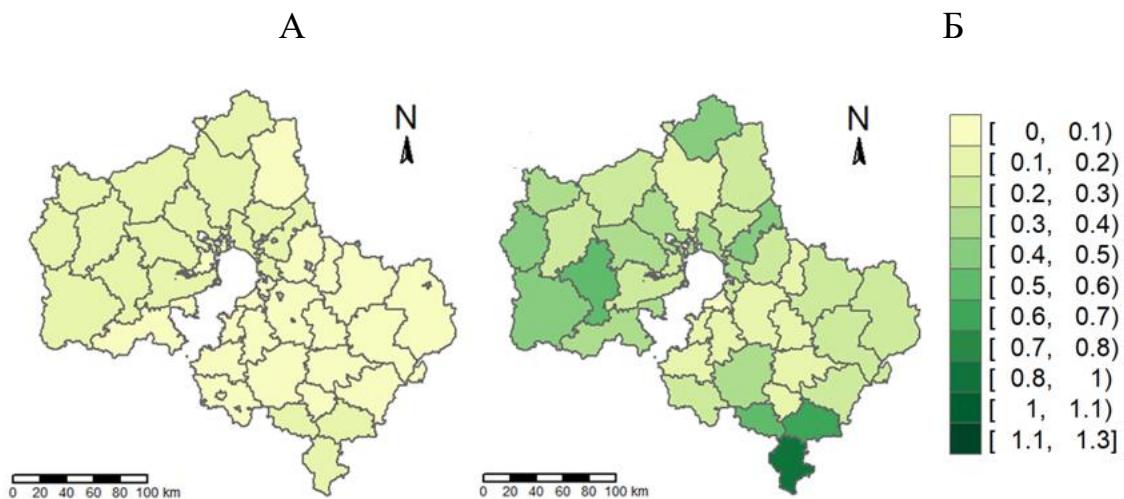


Рисунок 3.21 – Скорость секвестрации углерода пахотными почвами административных единиц Московской области (т С/га в год) по сценарию CHX, рассчитанная (А) по методике ФАО и (Б) с использованием статистических данных

Обращение к актуальным статистическим данным привело к росту прогнозируемых значений секвестрации в среднем по областям на 0,20 т С/га в год. Разброс значений увеличился на 15%, что указывает на более дифференцированный и индивидуальный подход к оценке секвестрации на муниципальном уровне. Реальные показатели существенно корректируются локальными факторами, среди которых важны история использования участков, исходные запасы углерода и интенсивность современных технологий. Моделирование в данном случае имеет преимущество перед системой мониторинга, так как при низких значениях секвестрации существующие тренды

могут не обнаруживаться из-за высокой временной и/или пространственной вариабельности (Романенков и др., 2023).

Прогнозирование на уровне почвенно-экологических зон (приложение № 6, рис. 3.22) показало, что наибольший потенциал к поглощению углерода имеют почвы зоны оподзоленных, выщелоченных и типичных черноземов и серых лесных почв лесостепи – 0,13 т С/га в год по оценкам, основанным на методике ФАО, и 1,02 т С/га в год по оценкам, полученным на статистических данных. Меньше всего секвестрируют почвы зоны дерново-подзолистых почв южной тайги 0,07 и 0,26 т С/га в год по оценкам методик ФАО и на статистических данных, соответственно. Для зоны серых лесных почв лиственных лесов эти показатели равны 0,10 и 0,53 т С/га в год.

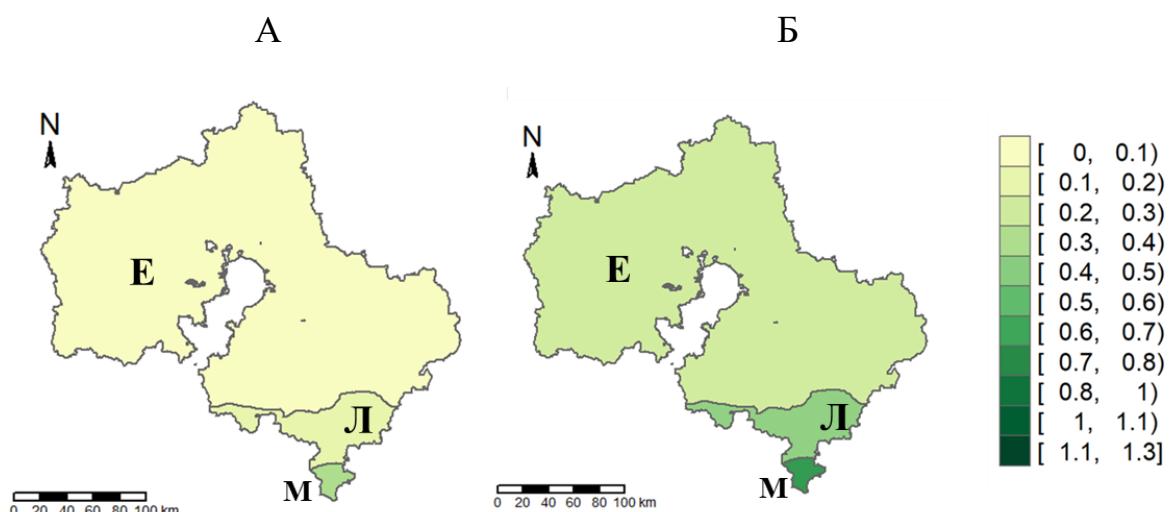


Рисунок 3.22 – Скорость секвестрации углерода пахотными почвами почвенно-экологических зон Московской области (т С/га в год) (А) по методике ФАО и (Б) с использованием статистических данных. Е - зона дерново-подзолистых почв южной тайги, Л – зона серых лесных почв лиственных лесов, М – зона оподзоленных, выщелоченных и типичных черноземов и серых лесных почв лесостепи

Расчеты прогнозируют накопление почвенного органического углерода на всей территории для любого из задуманных сценариев (рис. 3.23). Средние значения скорости секвестрации для сценариев СНХ, РИПР1, РИПР 2, РИПР3 равны 0,31, 0,35, 0,39, 0,46 тС га/год, соответственно. Наибольший потенциал для

накопления органического углерода имеют Зарайский и Каширский районы, находящиеся в зоне серых лесных почв, и Серебряно-Прудский район, расположенный в зоне оподзоленных, выщелоченных и типичных черноземов и серых лесных почв лесостепи, где наблюдаются наибольшие скорости накопления органического углерода. Для сценария РИПР3 они могут достигать 1,57 т С га/год.

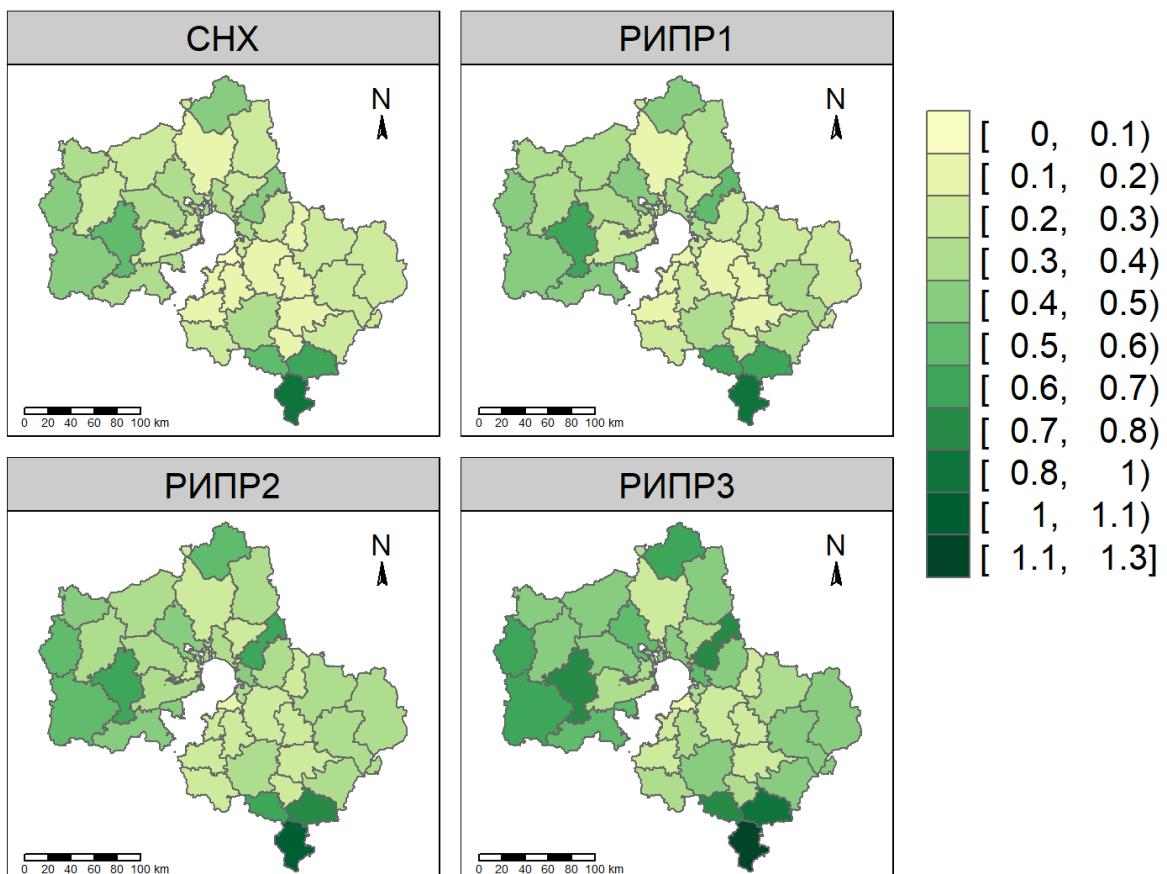


Рисунок 3.23 – Скорость секвестрации углерода пахотными почвами административных единиц Московской области (т С/га в год) по статистическим данным

Тенденция к накоплению углерода с ростом интенсивности углеродсберегающих технологий сохраняется при моделировании согласно почвенным зонам (рис. 3.24). Для сценария РИПР3 скорость секвестрации достигает 0,39 т С/га в год для зоны дерново-подзолистых почв южной тайги, 0,80 т С/га в год – для зоны серых лесных почв лиственных лесов и 1,57 т С/га в год – для зоны оподзоленных, выщелоченных и типичных черноземов и серых лесных почв лесостепи.

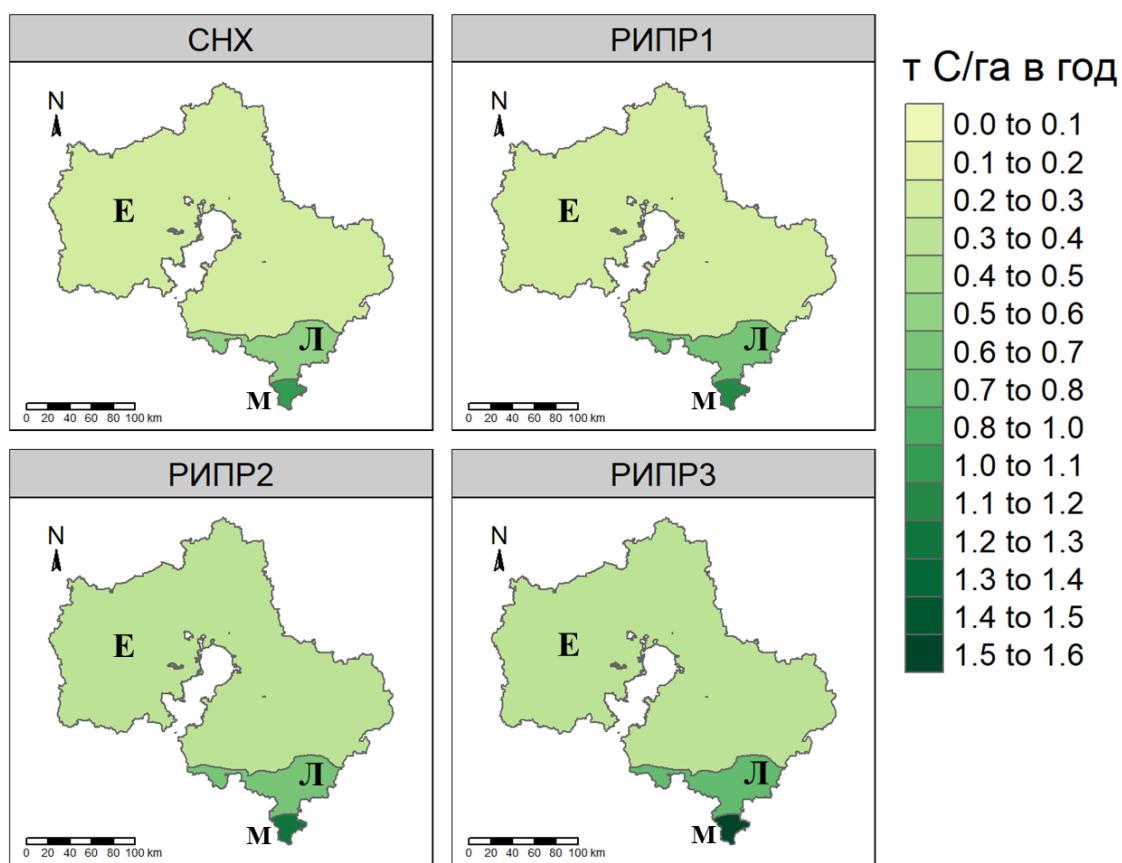


Рисунок 3.24 – Скорость секвестрации углерода пахотными почвами почвенно-экологических зон Московской области (т С/га в год) по статистическим данным. Е - зона дерново-подзолистых почв южной тайги, Л – зона серых лесных почв лиственных лесов, М – зона оподзоленных, выщелоченных и типичных черноземов и серых лесных почв лесостепи

Таким образом, обращение к локальным статистическим данным смещает оценки скоростей секвестрации в положительную сторону (на 0,22 т С/га в год), что дает возможность уверенно говорить о тенденции к закреплению углерода на всей территории пахотных почв Московской области. Эта тенденция сохраняется для всех рассмотренных сценариев: от сохранения неизменного хозяйствования до наиболее интенсивного применения ресурсосберегающих практик. В целом, по области наблюдается дифференцирование районов по скоростям секвестрации углерода, что говорит об учете специфических условий муниципальных образований при использовании национальной статистики.

3.3.2 Оценка скорости секвестрации углерода для Ростовской области

Расчеты скорости абсолютной секвестрации углерода в Ростовской области по традиционной методике, предложенной ФАО, показали близкие к нулевым значения (Романенков и др., 2023; Romanenkov et al., 2024). Медиана составила - 0,007 т С/га в год при сохранении практик хозяйствования (сценарий CHX). Это говорит о том, что в среднем по области зарегистрирована эмиссия углерода. Распределение скорости секвестрации углерода отлично от нормального, минимум оказался в точке -0,030 т С/га в год, максимум – 0,013 т С/га в год. Первый quartиль составил -0,010 т С/га в год, третий – 0,001 т С/га в год (рис. 3.25).

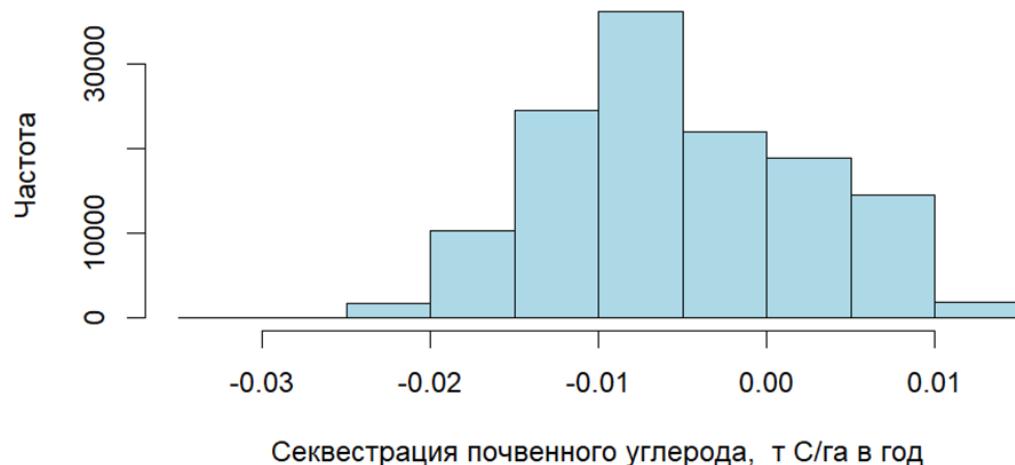


Рисунок 3.25 – Гистограмма распределения скорости секвестрации Ростовской области, рассчитанной по методике ФАО (т С/га в год)

Несколько иные оценки скорости секвестрации получены при использовании локальных статистических данных. Для сценария CHX произошел сдвиг в сторону положительных значений, медиана составляет 0,032 т С/га в год. То есть Ростовская область вместо эмитента углерода теперь может быть категорирована как поглотитель.

Наблюдается рост разброса значений (рис. 3.26) от минимума в точке -0,093 т С/га в год до максимум в точке 0,260 т С/га в год. Первый quartиль составляет -0,007 т С/га в год, третий достигает 0,081 т С/га в год.

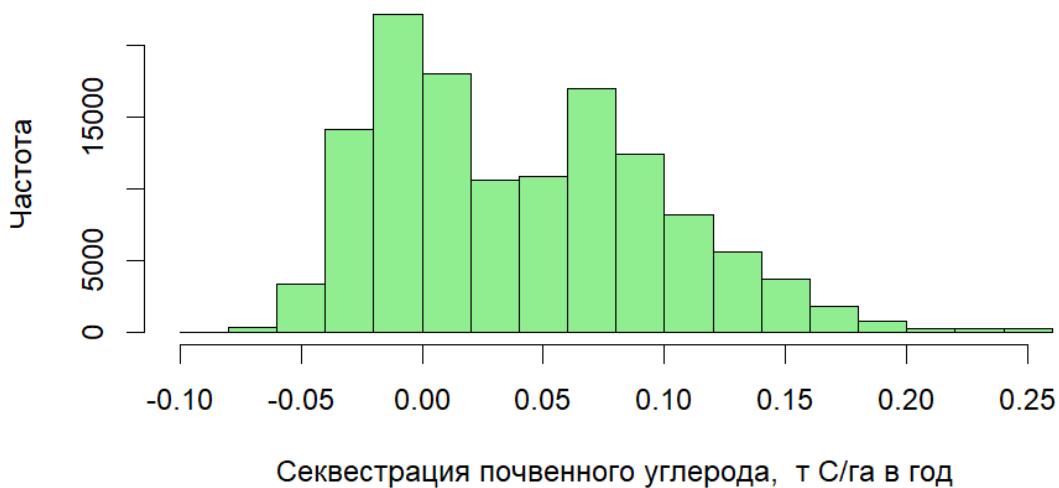


Рисунок 3.26 – Гистограмма распределения скорости секвестрации Ростовской области, рассчитанной по статистическим данным (т С/га в год)

При сравнении данных, полученных для двух методик видно, что при использовании локальных данных появляется больший разброс значений, а также вытянутый «правый хвост», при этом медианные значения скорости секвестрации по двум методикам различаются незначительно – на 0,039 т С/га в год (рис. 3.27).

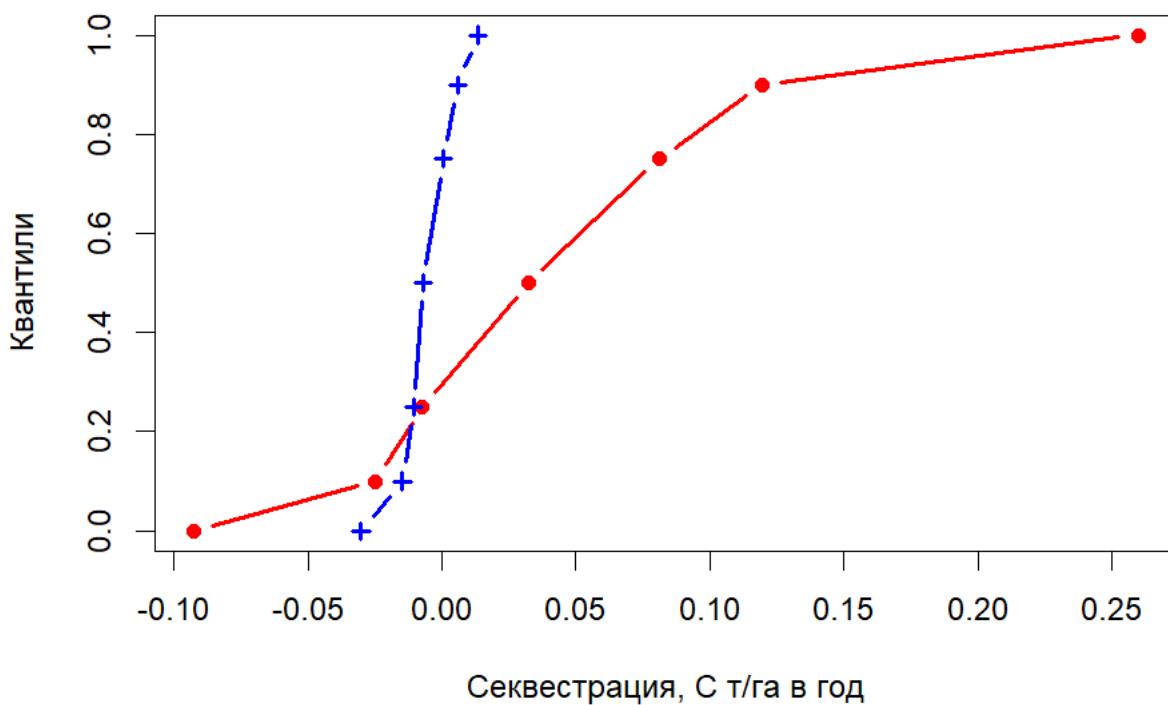


Рисунок 3.27 – Квантильное распределение значений скоростей секвестрации по территории Ростовской области, рассчитанное по методике ФАО (синяя линия, крестик) и по локальным данным (красная линия, кружок)

Скорость секвестрации углерода почвами (т С/га в год) Ростовской области по административному делению, рассчитанная по двум методикам, представлена в приложении № 7 и на рисунке 3.28.

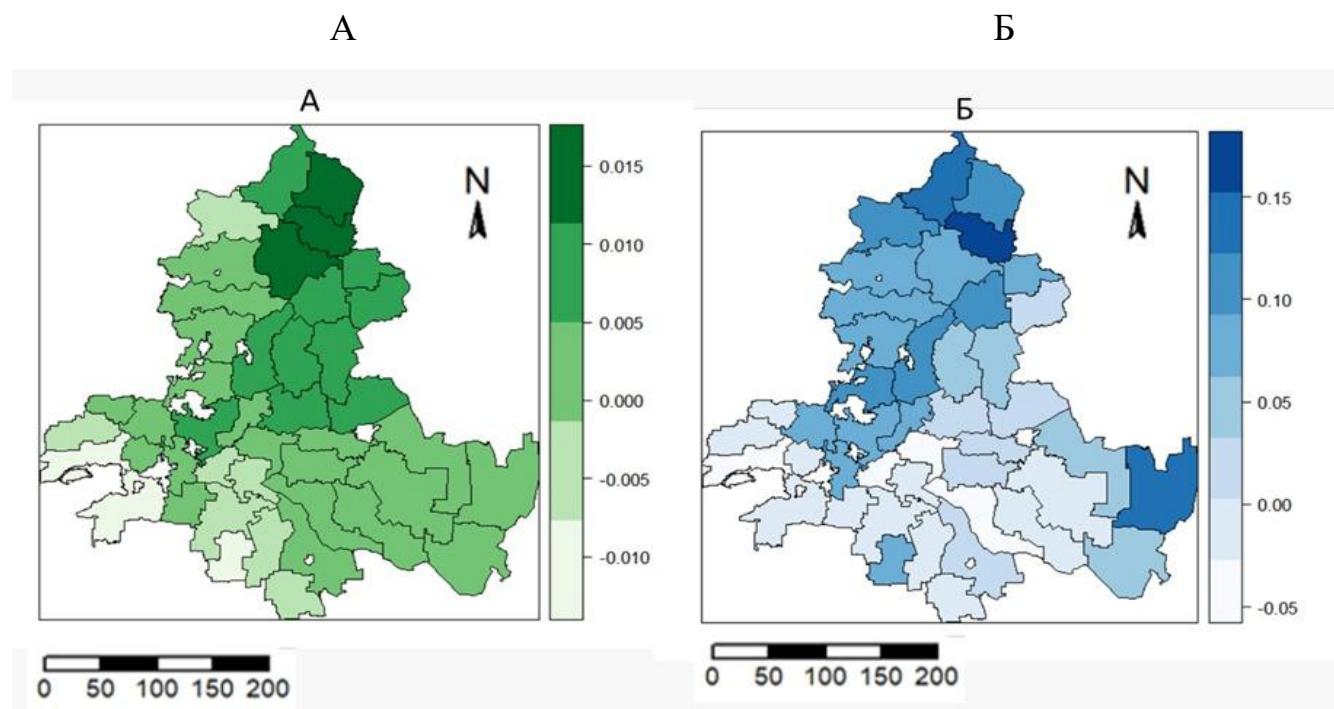


Рисунок 3.28 – Скорость секвестрации углерода пахотными почвами административных единиц Ростовской области (т С/га в год) по сценарию СНХ, рассчитанная (А) по методике ФАО и (Б) с использованием статистических данных

В среднем по областям сдвиг значений составляет 0,047 т С/га в год. Отрицательные значения в среднем наблюдаются у 12 районов Ростовской области из 43, однако все значения практически близки к нулю. При применении углеродсберегающих технологий все районы демонстрируют положительную динамику.

В целом для области средняя скорость секвестрации изменяется статистически незначимо при переходе на другой источник данных, однако неравномерность скоростей секвестрации внутри области становится заметнее. Так, при прогнозировании на уровне почвенно-экологических зон оказалось, что для зоны обычновенных и южных черноземов степи, а также для зоны светлокаштановых и бурых почв полупустыни появляется ощутимая тенденция к закреплению углерода. Оценки для этих зон, соответственно, смещаются с -0.006 т

С/га в год и -0,011 т С/га в год при применении методики ФАО до 0,044 т С/га в год и 0,110 т С/га в год при использовании статистических данных. Оценки для зоны темно-каштановых и каштановых почв сухой степи остаются примерно на одном уровне: -0,009 т С/га в год для методики ФАО и -0,010 т С/га в год при применении статистических данных (приложение №8, рис. 3.29).

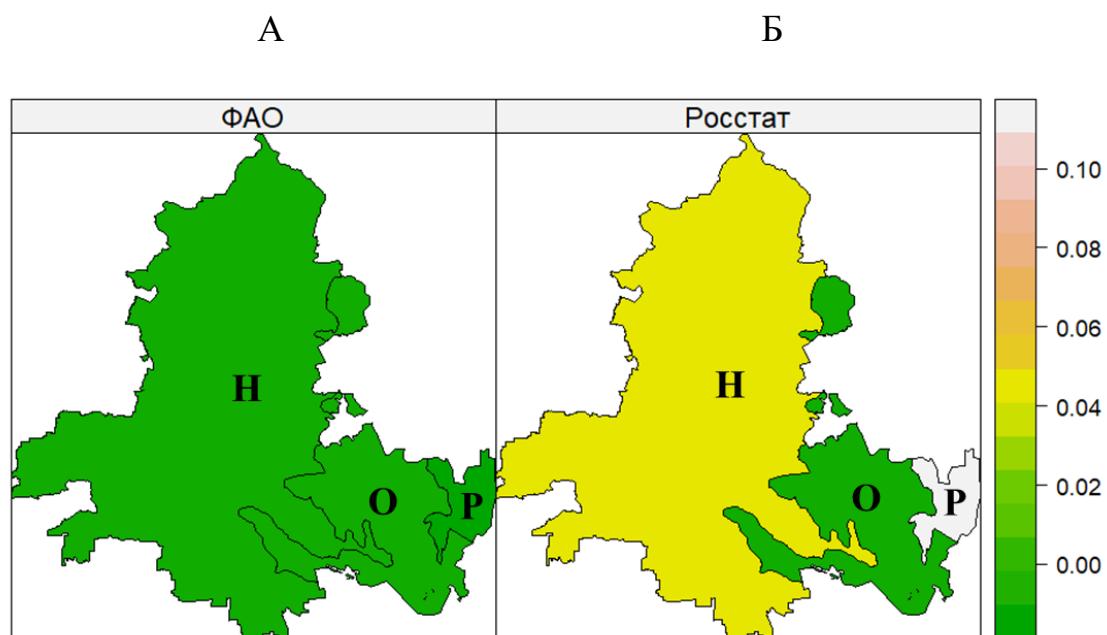


Рисунок 3.29 – Скорость секвестрации углерода пахотными почвами почвенно-экологических зон Ростовской области (т С/га в год) (А) по методике ФАО и (Б) с использованием статистических данных. Н-Зона обычновенных и южных чернозёмов степи, О-Зона тёмно-каштановых и каштановых почв сухой степи, Р-Зона светло-каштановых и бурых почв полупустыни

Тенденция к накоплению углерода ожидается для всех сценариев при моделировании с использованием национальных баз данных (рис. 3.30). Медианные значения скорости секвестрации углерода сельхозугодиями Ростовской области при рациональном использовании почвенных ресурсов равны 0,063, 0,096 и 0,161 т С/га в год для сценариев РИПР1, РИПР2 и РИПР3, соответственно.

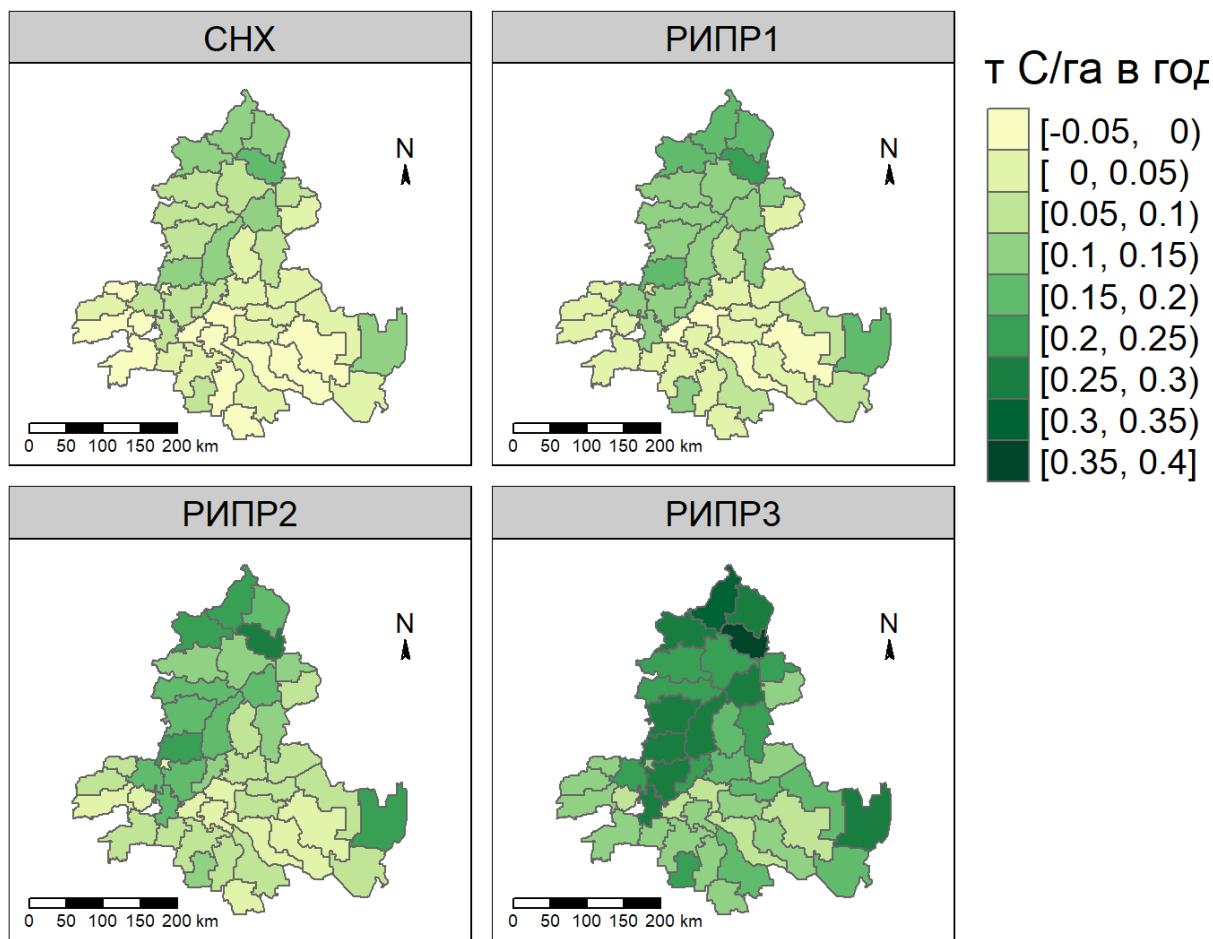


Рисунок 3.30 – Скорость секвестрации углерода пахотными почвами административных единиц Ростовской области (т С/га в год) по статистическим данным

Наибольший потенциал накопления углерода отмечены для Боковского, Верхнедонского и Красносулинского районов. Скорость секвестрации при наиболее интенсивных углеродсберегающих практиках (сценарий RIIPR3) там составляет 0,364, 0,319 и 0,300 т С/га в год, соответственно.

Почвенные зоны также откликаются увеличением скорости секвестрации при интенсификации углеродсберегающих технологий (рис.3.31). Для сценария RIIPR3 скорость секвестрации достигает 0,176 т С/га в год для зоны обычновенных и южных чернозёмов степи, 0,096 т С/га в год – для зоны тёмно-каштановых и каштановых почв сухой степи и 0,228 т С/га в год – для зоны светло-каштановых и бурых почв полупустыни.

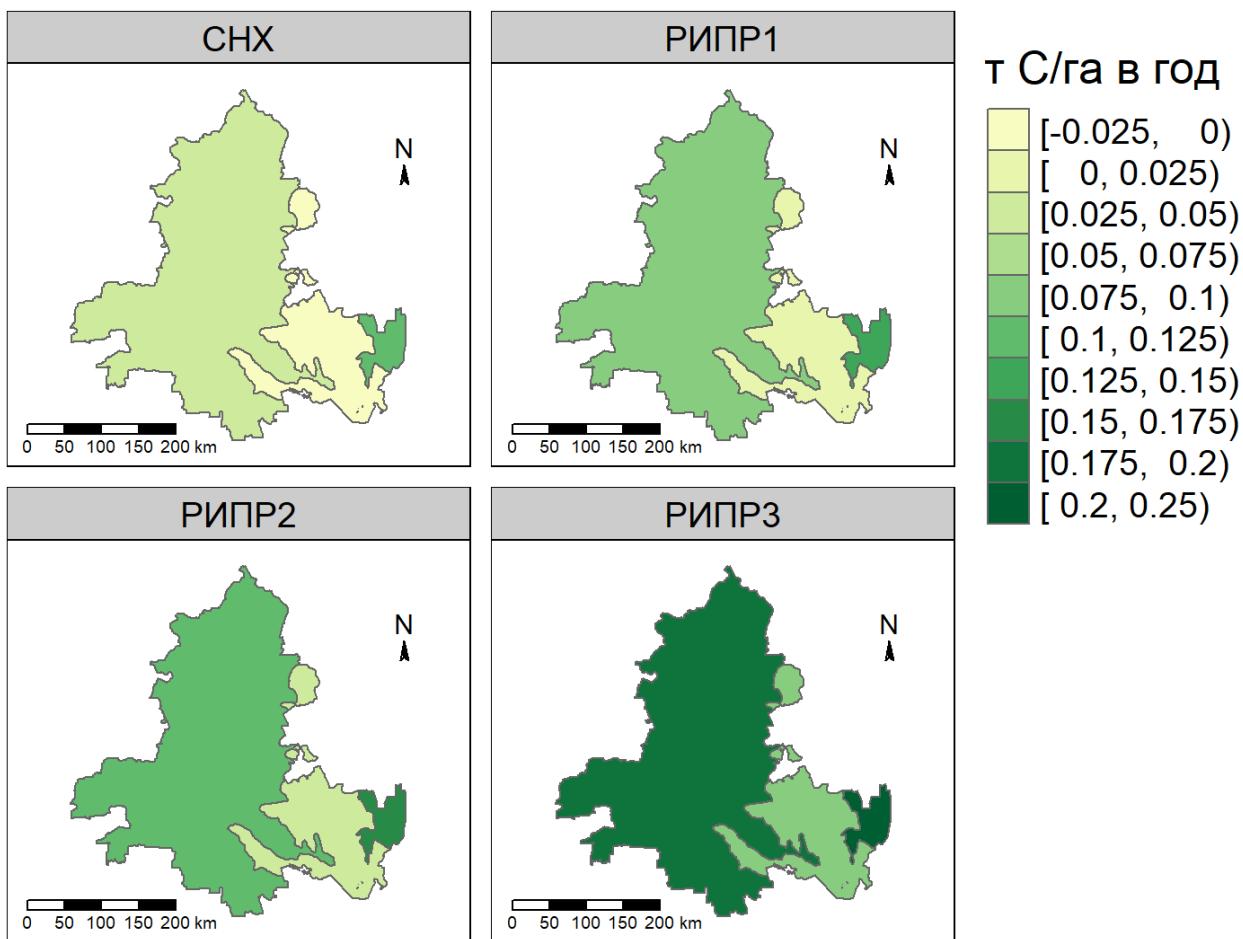


Рисунок 3.31 – Скорость секвестрации углерода пахотными почвами почвенно-экологических зон Ростовской области (т С/га в год) по статистическим данным. Н-Зона обычновенных и южных чернозёмов степи, О-Зона тёмно-каштановых и каштановых почв сухой степи, Р-Зона светло-каштановых и бурых почв полупустыни

Таким образом, в отличие от результатов, полученных ранее для регионов РФ (Romanenkov et al., 2024), по новым оценкам Ростовская область входит в число регионов с наибольшим приростом объемов секвестрации при условии выполнения сценариев реализации практик устойчивого управления почвенными ресурсами, который может быть оценен в 475–1244 Кг в год.

3.3.3 Обсуждение результатов, полученных по скоростям секвестрации

Переход к более подробным и статистически обоснованным входным данным в части поступления органического вещества дает возможность получать

уточненные сведения о запасах углерода и скорости его секвестрации, дифференцированные для каждого муниципального образования.

Оценки скорости секвестрации для Московской и Ростовской областей при обращении к национальным данным оказались выше, чем аналогичные прогнозы на основе глобальных данных. Для Московской области значение отличалось в большую сторону на 0,22 т С/га в год, для Ростовской – на 0,039 т С/га в год. Это дало возможность к однозначному причислению областей к разряду поглотителей углерода.

Определенный интерес представляют собой результаты моделирования скоростей секвестрации, полученные для шести зон почвенно-экологического районирования от зоны дерново-подзолистых почв южной тайги на севере до светло-каштановых и бурых почв полупустыни на юге (табл. 3.6).

Таблица 3.6

Скорость секвестрации углерода пахотными почвами Московской и Ростовской областей (т С/га в год)

Почвенно-экологическая зона	Методика ФАО	Использование локальных данных
Е Зона дерново-подзолистых почв южной тайги	0,075	0,257
Л Зона серых лесных почв лиственных лесов	0,100	0,535
М Зона оподзоленных, выщелоченных и типичных черноземов и серых лесных почв лесостепи	0,134	1,024
Н Зона обыкновенных и южных чернозёмов степи	-0,006	0,044
О Зона тёмно-каштановых и каштановых почв сухой степи	-0,009	-0,010
Р Зона светло-каштановых и бурых почв полупустыни	-0,011	0,110

Оказалось, что скорость секвестрации при применении методики расчета ФАО растет при продвижении с севера на юг, достигая своего пика в зоне оподзоленных, выщелоченных и типичных черноземов и серых лесных почв

лесостепи (0,134 т С/га в год), а затем последовательно снижается до отрицательных значений. Прогнозы, основанные на статистических данных, повторяют эту тенденцию с одним отличием: в зоне светло-каштановых и бурых почв полупустыни скорость секвестрации резко возрастает и достигает 0,110 т С/га в год. Однако это может быть вызвано крайне малой площадью, попадающей в данную зону.

Оценки, полученные различными методиками, согласуются общей тенденцией и поддаются трактовке. Единственное отличие тренда в зоне светло-каштановых и бурых почв полупустыни говорит о необходимости расширить область исследования в будущих работах.

Таким образом, получены медианные значения скоростей секвестрации углерода пахотными почвами, основанные на глобальных базах данных (0,09 т С/га в год для Московской области и -0,07 т С/га в год для Ростовской области), а также на национальных базах данных (0,31 т С/га в год для Московской области и 0,032 т С/га в год для Ростовской области). Оценки, полученные на основе данных Росстата, оказались выше тех, что получены на основе рекомендованной методики ФАО. Кроме того, вырос разброс значений при прогнозировании на муниципальном уровне. В Московской области наибольшие значения получены для Серебряно-Прудского района (0,825 т С/га в год), в Ростовской области – в Боковском районе (0,170 т С/га в год).

Результаты моделирования по Московской и Ростовской областям показали, что подход для расчета поступающего в почву количества органического вещества на основе использования статистических данных Росстата может быть распространен на другие субъекты РФ. Подобный подход позволяет региональным органам власти адресно подходить к реализации приоритетных стратегий и программ развития сельского хозяйства.

После получения новых оценок потенциала секвестрации углерода пахотными почвами следующим шагом развития работ в данном направлении видится разработка конкретных рекомендаций мер по направленному изменению запасов углерода ПОВ. В работе Семёнова, Когута и Иванова(2025) проведен обзор

последних работ по эффективности углеродсберегающих технологий в его накоплении, а также даны собственные оценки. Так, по снижению эффективности технологии располагаются в ряду: внесение биочара – агролесоводство – внесение компоста – залужение пахотных земель – внесение навоза – возделывание культур с глубокой корневой системой – покровные культуры – органическое земледелие – растительные остатки – нулевая и минимальная технология обработки – диверсификация севооборота – минеральные удобрения – орошение. Однако также отмечается, что углерод из перемещенных источников (удобрения и растительные остатки) не может считаться секвестрированным.

Затруднения в прогнозировании количественных показателей ожидаемого эффекта от мер углеродсберегающих практик обусловлены вариабельностью результатов их применения, тем не менее в наших силах сформировать такой набор практик, который будет определенно максимизировать секвестрацию углерода (Семёнов, Когут, Иванов, 2025). Так как смена назначения пахотных земель не рассматривается в данной работе, а источник органических удобрений, как правило, располагается вне рассматриваемого ландшафта, то представляется целесообразным в первую очередь применение таких мер, как травосеяние, пересмотр севооборота (отказ от чистых паров) и набора составляющих его культур (Кулачкова и др., 2025), как наиболее эффективных.

Особенность севооборотов в Московской области, а именно обилие пропашных культур, создают условия для минерализации и потерь углерода. Размещение многолетних трав (люцерна, клевер) способствует существенному накоплению подземной биомассы и защите почв от эрозии, однолетние травы (например, вико-овсяная смесь, люпин) в качестве сидератов накапливают значительное количество углерода по причине широкого отношения поглощенного углерода к потерянному за счет дыхания. Также следует оптимизировать систему азотного питания, однако ввиду относительно высокого уровня осадков необходимо избегать вымывания нитратов с дренажными водами.

В Ростовской области риски потерь углерода обусловлены, помимо прочего, интенсивной ветровой эрозией, а продуктивность растений лимитирована

обеспеченностью осадками. Точные методы земледелия, капельное орошение, технологии категории no-till и mini-till в этих условиях могут существенно отразиться на балансе почвенного углерода. В последние десятилетия структура посевных площадей сосредоточена на экономически выгодные культуры: озимая пшеница, подсолнечник и ячмень яровой. Добавление C-4 растений в севооборот позволяет накапливать значительную биомассу благодаря их способности эффективно использовать CO₂ в условиях высоких температур (кукуруза, сорго). Высокой способностью к поглощению почвенного углерода в фитомассе наблюдается у рапса ярового, горчицы белой (Кулачкова и др., 2025). Севообороты в Ростовской области, как правило, бедны на травы, поэтому введение такой многолетней бобовой культуры как люцерна на корм и однолетней кормовой культуры как сорго суданское (суданская трава) может дополнительно секвестрировать углерод. Для роста биопродуктивности пашни при нехватке влаги также целесообразно увеличение доли культур с глубокой корневой системой (кукуруза, подсолнечник), если в текущем севообороте они пока не используются. В условиях недостатка осадков следует осторожно относиться к увеличению применения минеральных удобрений, так как в сухую погоду они могут вызвать негативный эффект. В таком случае дополнительное минеральное питание стоит обеспечивать листовыми подкормками (при строгом соблюдении концентрации раствора и условий распыления), а также давать дополнительный азот в форме жидких удобрений (наиболее распространено применение KACa).

3.3.4 Возможность достижения национальной цели «2 на 1000» для Московской и Ростовской областей

Одним из результатов моделирования является карта запасов углерода на 2020 год. Доли в 4 и в 2 промилле от этого запаса являются целевыми для достижения соответствующих глобальной и национальной целей.

Медианное значение запасов углерода в пахотных почвах Московской области, рассчитанное на 2020 год, составляет 55,1 т С/га. Распределение этого показателя изображено на гистограмме (рис. 3.32): минимум находится в значении

12,6 т С/га, максимум в значении 247,2 т С/га, первый quartиль – 47,0 т С/га, третий – 80,6 т С/га. Суммарные запасы углерода составляют 73,3 Кт С. Они были рассчитаны как произведение медианного значения запасов и площади пахотных почв. Для увеличения точности расчетов этот показатель был найден отдельно для каждой почвенно-экологической зоны и просуммирован по всей области.

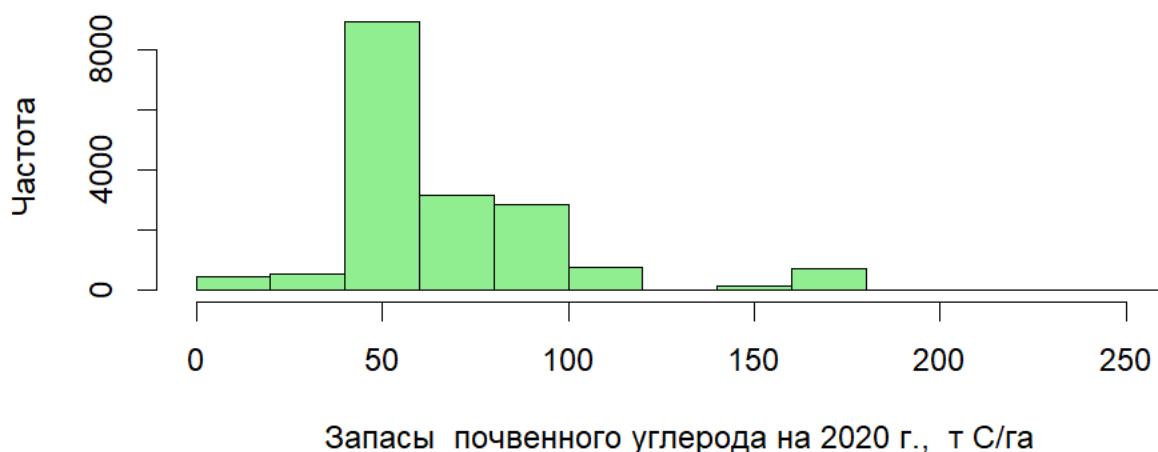


Рисунок 3.32 – Распределение запасов углерода в 0-30 см почвы Московской области

Для того, чтобы верифицировать первые изменения в запасах углерода почвы путем отбора почвенных проб, нужно оценить, через сколько лет изменения достоверно выйдут за границу неопределенности. Неопределенность для сценария неизменного хозяйствования составила 14,1% при расчете скорости секвестрации путем моделирования, что говорит о возможности зарегистрировать первые изменения при их увеличении (снижении) на 7,8 т С/га. При скорости секвестрации 0,31 т С/га в год первые изменения могут быть верифицированы через 25 лет. Предполагается, что при наличии данных РосАгрохимслужбы о запасах углерода, привязанных к угодиям, было бы возможно отследить изменения запасов заметно раньше, так как использование смешанных проб из 20-30 индивидуальных образцов, характеризующих рабочие участки, приводит к снижению варьирования.

Целевые показатели в 4 и 2 промилле от запасов проиллюстрированы на рисунке 3.33. Медианное значение для всей области составляет 0,22 т С/га в год для

достижения 4 промилле и 0,11 т С/га в год, соответственно, для достижения 2 промилле. Рассчитанные нами значения скорости секвестрации при сценарии СНХ для Московской области достигли 0,31 т С/га в год. Это значит, что при обращении к статистическим данным появляется возможность утверждать о выполнимости целей 4 и 2 промилле, даже не прибегая к углеродсберегающим технологиям.

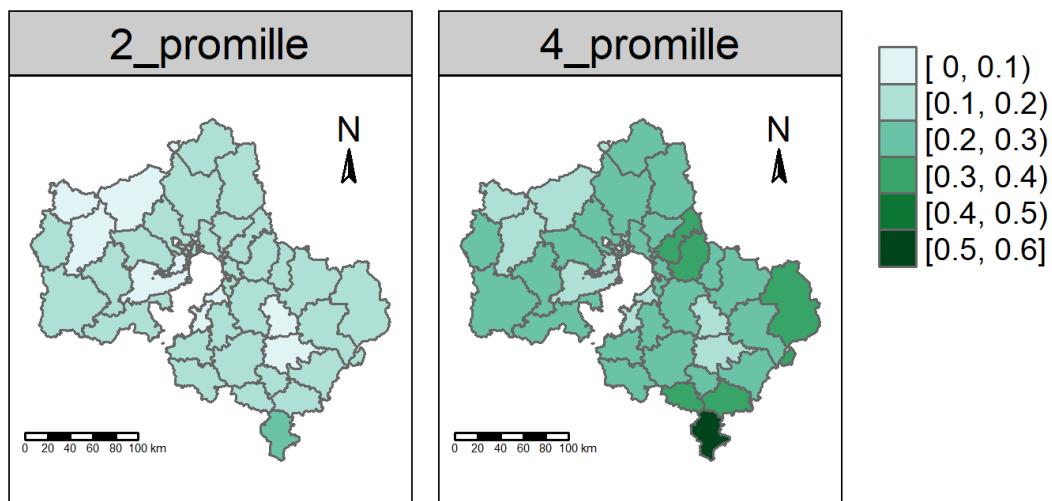


Рисунок 3.33 – Целевые показатели скорости секвестрации углерода пахотными почвами Московской области в 4 и 2 промилле (т С/га в год) по статистическим данным

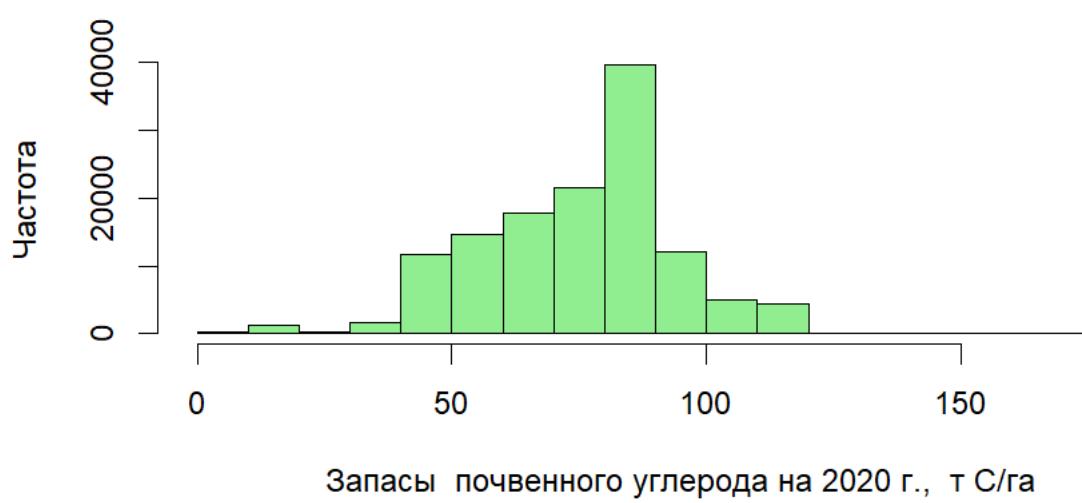


Рисунок 3.34 – Распределение запасов углерода в 0-30 см почвы Ростовской области

Для Ростовской области медианное значение запасов углерода в пахотных почвах на 2020 год составляет 78,1 т С/га. Распределение так же отлично от

нормального (рис. 3.34): минимум находится в значении 14,0 т С/га, максимум в значении 180,1 т С/га, первый quartиль – 61,9 т С/га, третий – 88,5 т С/га. Суммарные запасы углерода составляют 428,6 Кт С.

Целевые показатели в 4 и 2 промилле от запасов проиллюстрированы на рисунке 3.35. Медианное значение для всей области составляет 0,31 т С/га в год для достижения 4 промилле и 0,16 т С/га в год – для достижения 2 промилле. Рассчитанные нами значения скорости секвестрации при наиболее интенсивном сценарии РИПРЗ для Ростовской области составляли 0,16 т С/га в год. Уровень плодородия почв Ростовской области задает высокий рубеж для достижения целевых значений 4 и 2 промилле. Поэтому реально дотянуться лишь до цели в 2 промилле при условии наиболее интенсивных практик сохранения углерода РИПРЗ.

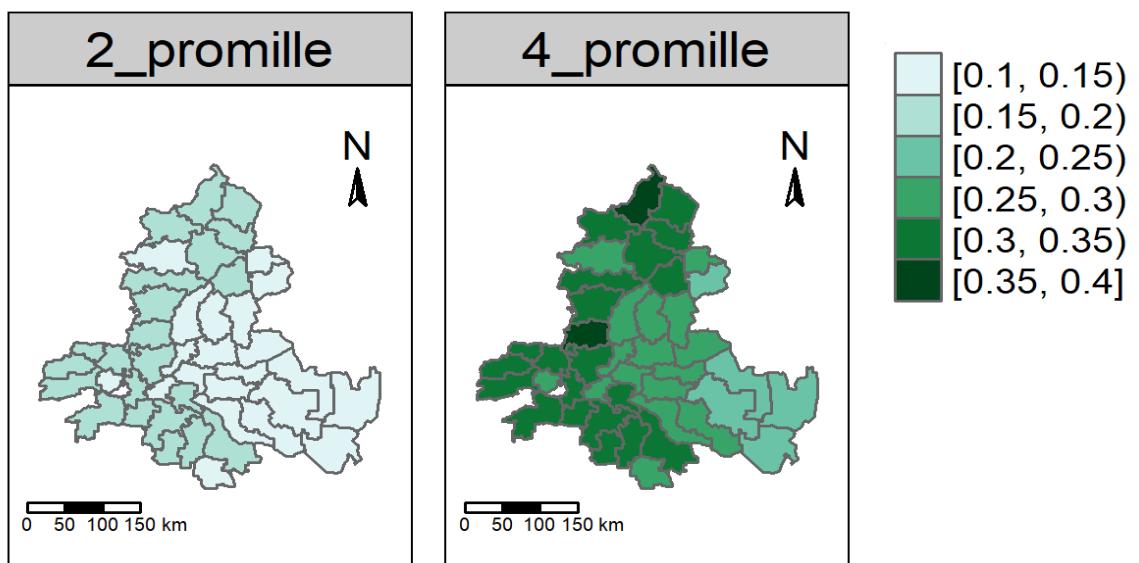


Рисунок 3.35 – Целевые показатели скорости секвестрации углерода пахотными почвами Ростовской области в 4 и 2 промилле (т С/га в год) по статистическим данным

Таким образом, при использовании данных Росстата для Московской области оказалось возможным достижение глобальной цели секвестрации углерода при любом рассмотренном сценарии. Для Ростовской области возможно достичь лишь цели в 2 промилле при наиболее интенсивных углеродсберегающих технологиях (РИПРЗ).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе показано, что методическая основа оценки секвестрационного потенциала пахотных почв оказывает определяющее влияние на получаемые результаты. Проведенное сравнительное исследование, основанное на применении стандартного подхода ФАО, использующего обобщенные глобальные климатические данные и модель MIAMI для расчета чистой первичной продукции (NPP), и альтернативного подхода, основанного на детализированных статистических данных Росстата, продемонстрировало некоторые расхождения в итоговых оценках. Было установлено, что использование усредненных климатических параметров приводит к выявлению пространственной неоднородности, связанной с зональностью и фациальностью климатических проявлений, в то время как учет реальных показателей урожайности и структуры посевных площадей на муниципальном уровне позволяет выявить значительную вариабельность продуктивности агроэкосистем и, как следствие, секвестрационного потенциала почв.

Пахотные почвы Московской области в целом выполняют функцию чистого поглотителя атмосферного углерода, однако количественные оценки этого процесса различаются в зависимости от выбранной методики оценки. Моделирование по методике ФАО определило медианную скорость секвестрации на уровне 0,09 т С/га в год, в то время как расчет на основе данных Росстата показал более чем трехкратное превышение этого показателя – 0,31 т С/га в год. Более того, был выявлен ключевой практический результат: локализованный подход позволил не только увеличить средние значения, но и идентифицировать конкретные муниципальные образования с максимальным потенциалом (Зарайский, Каширский, Серебряно-Прудский районы), где скорости секвестрации для сценария неизменного хозяйствования превышают 0,8 т С/га в год, а при переходе на интенсивные углеродсберегающие практики (РИПР3) достигают 1,57 т С/га в год.

Таким образом, переход от глобальных данных к использованию национальной статистики является необходимым условием для формирования

адекватной и пространственно детализированной картины углеродного баланса агроландшафтов. Полученные результаты имеют важное прикладное значение для разработки и реализации климатических проектов, а также для формирования адресной региональной политики.

Проведенное исследование способствует развитию теоретических и прикладных основ агроэкологии в рамках заявленной специальности. Работа разрабатывает и апробирует усовершенствованную модель оценки плодородия, ключевым параметром которого выступает реализация потенциала, заложенного климатическими условиями. Полученная пространственно-детализированная модель позволяет перейти от абстрактных оценок к адресному управлению параметрами почвенного плодородия на муниципальном уровне. Исследование предоставляет количественно обоснованную методику для изучения параметров секвестрации углерода, напрямую связывая их с агроэкологическими задачами повышения гумусированности пахотных почв и создавая научную базу для разработки климатических проектов, направленных на сокращение эмиссии СО₂. Выявленная вариабельность секвестрационного потенциала по территории Московской и Ростовской областей может послужить основой для разработки дифференцированных адаптивно-ландшафтных систем земледелия и обоснования выбора ресурсо- и углеродосберегающих технологий обработки почв, ориентированных на максимальную реализацию природного потенциала конкретных агроландшафтов.

ВЫВОДЫ

1. На основе проведенной оценки для десяти областей России по методике ФАО было показано, что потенциал секвестрации углерода в слое 0–30 см пахотных почв при сценарии неизменного хозяйствования изменяется от -0,012 т С/га в год до 0,150 т С/га в год и в среднем составляет 0,054 т С/га в год. Наиболее активная секвестрация углерода наблюдается на территориях с преобладанием серых лесных почв лиственных лесов, а также оподзоленных, выщелоченных и типичных черноземов и серых лесных почв лесостепи.

2. Переход к интенсивным технологиям РИПР приводит к увеличению показателя абсолютной скорости секвестрации почв. Получены значения от 0,025 до 0,202 т С/га в год для сценария РИПР1, от 0,053 до 0,256 т С/га в год – для РИПР2, от 0,106 до 0,362 т С/га в год – для РИПР3. Минимум фиксируется на юго-востоке Ростовской области, а максимум – на юге Тульской области.

3. Разработанная методика расчета чистой первичной продукции показала иные оценки медианы скорости секвестрации углерода пахотными почвами, которые оказались выше оценок, рассчитанных по методике ФАО. Для сценария неизменного хозяйствования они составили 0,31 т С/га в год в Московской области и 0,032 т С/га в год в Ростовской области, а также увеличился разброс значений.

4. Оценки чистой первичной продукции на основе локальных статистических данных свидетельствуют о реализации потенциала продуктивности, ожидаемого по результатам климатической модели. В Московской области медианное значение чистой первичной продукции оказалось выше и составило 5,40 т С/га в год. Для Ростовской области медианное значение составило 3,58 т С/га в год.

5. Неопределенность картографических расчетов запасов углерода и их изменений варьируется от 14,1% для сценария неизменного хозяйствования до 15,4% для сценария РИПР3. При необходимости сопоставления с данными, полученными в результате полевых исследований, неопределенность вырастет до 18,5% для сценария неизменного хозяйствования и до 19,5% для сценария РИПР3.

6. Расчет по методике ФАО показал недостижимость глобальной цели «4 на 1000» на всей рассмотренной территории при всех рассмотренных сценариях моделирования. При обращении к наиболее интенсивному сценарию РИПР3 может быть достигнута альтернативная цель «2 на 1000» для почв трех из пяти зон почвенно-экологического районирования. При переходе на национальные статистические данные обе цели оказались достижимы для любого сценария в Московской области, а в Ростовской области оказалось возможным секвестрировать 2 промилле при сценарии РИПР3.

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ

МГЭИК - Международная группа экспертов по изменению климата;

ПОВ – почвенное органическое вещество;

ПОУ – почвенный органический углерод (или SOC – soil organic carbon);

РИПР – рациональное использование почвенных ресурсов (или SSM – Soil Sustainable Management);

CHX – сценарий неизменного хозяйствования (или BAU – business as usual);

ФАО ООН – Продовольственная и сельскохозяйственная организация Объединенных наций;

ЭП – элементы питания;

BIO – пул микробной биомассы;

DPM (decomposable plant material) – пул разлагаемого растительного материала;

GPP (gross primary production) – валовая первичная продукция;

GSOCseq (The Global Soil Organic Carbon Sequestration Potential Map) – Глобальная карта потенциала секвестрации пахотных почв;

HUM – пул гумифицированного органического вещества;

МОМ (Mineral-associated Organic Matter) – связанное с минералами органическое вещество;

NPP (net primary production) – чистая первичная продукция;

POM (Particulate Organic Matter) – твердые органические частицы;

RPM (resistant plant material) – пул стойкого растительного материала;

SSP (shared socio-economic pathways) – общие социально-экономические пути развития;

WWF – Всемирный фонд дикой природы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алябина И.О., Голозубов О.М., Чернова О.В. Некоторые направления применения статистических методов в рамках Информационной системы «Почвенно-географическая база данных России» /под общ. ред. В.П. Самсоновой, М.И. Кондрашкиной, Ю.Л. Мешалкиной // Природная и антропогенная неоднородность почв и статистические методы ее изучения: сборник научных статей по материалам Всероссийской научной интернет-конференции с международным участием, посвященной 90-летию со дня рождения заслуженного профессора Е.А. Дмитриева, Москва, 17–18 ноября 2021 г. – М.: Издательско-торговая корпорация «Дашков и К», 2022. – С. 116–121.
2. Баренбаум А.А. Механизмы самоорганизации при глобальном геохимическом круговороте вещества на Земле // Синергетика. – 2000. – № .3. – С. 275–295.
3. Безуглова, О.С., Орлов Д.С. Биогеохимия: учебник для студентов высших учебных заведений. Серия «Учебники, учебные пособия». – Ростов н/Д: «Феникс», 2000. – 320 с.
4. Безуглова О.С., Назаренко О.Г., Ильинская И.Н. Динамика деградации земель в Ростовской области // Аридные экосистемы. – 2020. – Т. 26. – № 2 (83). – С. 10–15. DOI: 10.24411/1993-3916-2020-10090
5. Безуглова О.С., Хырхырова М.М. Почвы Ростовской области: учебное пособие – Ростов н/Д: Изд-во ЮФУ, 2008. – 352 с.
6. Битва за климат: карбоновое земледелие как ставка России: экспертный доклад / под ред. А.Ю. Иванова, Н.Д. Дурманова. – М.: Издательский дом НИУВШЭ, 2021. – 120 с.
7. Бурков В.Д., Крапивин В.Ф., Шалаев В.С. Сбалансированная модель глобального биогеохимического круговорота углерода // Лесной вестник / Forestry Bulletin. – 2012. – Т. 9. – № 92. – С. 86–93.
8. Бурукина О.А. Выбросы углекислого газа и возможности депонирования углерода // Фундаментальные и прикладные исследования по приоритетным направлениям биоэкологии и биотехнологии: Сборник материалов

VI Всероссийской научно-практической конференции с международным участием, Ульяновск, 22 мая 2023 года / Главный редактор Е.И. Антонова. – Чебоксары: Общество с ограниченной ответственностью «Издательский дом «Среда», 2023. – С. 13-22.

9. Вернадский, В.И. Химическое строение биосфера Земли и ее окружения. – М.: Наука, 2001. – 376 с.

10. Вилкова Л.П., Новичихин Е.П., Санталов Н.П., Яковлева Г.Д. Оценки параметров биогеохимического цикла углерода в глобальном и региональном масштабах // Проблемы окружающей среды и природных ресурсов: обзор. информ. – ВИНТИ, 1998. – № 7. – С. 24–37.

11. Глушков И.В., Лупачик В., Прищепов А.В., Потапов П.В., Пушкинская М.Ю., Ярошенко А.Ю., Журавлева И.В. Картирование заброшенных земель в восточной Европе с помощью спутниковых снимков Landsat и Google Earth Engine // Современная наука о растительности: матер. науч. конф., – М., 2019. – 19 с.

12. Голозубов О.М., Чернова О.В. Динамическое формирование и обновление карты запасов органического углерода на территории России как задача интеллектуального анализа Больших данных // Интеллектуальные системы. Теория и приложения. – 2022. – Т. 26, № 1. – С. 153 – 159.

13. Голозубов О.М., Колесникова В.М., Чернова О.В. Система стандартов цифровых представлений почвенных описаний // Почвы – стратегический ресурс России: тезисы докладов VIII съезда Общества почвоведов им. В.В. Докучаева и Школы молодых ученых по морфологии и классификации почв. – Москва–Сыктывкар: Институт биологии Коми научного центра Уральского отделения РАН, 2021. – С. 494–495.

14. Государственный (национальный) доклад о состоянии и использовании земель в Российской Федерации в 2020 году / под ред. О.А. Скуфинского, А.И. Бутовецкого, Г.Ю. Елизаровой, Е.В. Мартыновой, М.С. Смирнова, А.В. Штейникова, С.В. Белокопытова, Ю.Е. Дмитриева, Д.Г. Исмаиловой, О.А. Кастаньо, Н.В. Корнилович, В.И. Корякина, Ю.В. Куницыной, Л.С. Лилиной, М.Д. Харитова, К.А. Литвинцева, Т.П. Турчановой – М.: Росреестр, 2021. – 197 с.

15. Дергачева М.И. Органическое вещество почв: статика и динамика: на примере Западной Сибири. – Новосибирск: Наука, 1984. – 153 с.
16. Добровольные руководящие принципы рационального использования почвенных ресурсов [Электронный ресурс] от 10.01.2017 // Официальный сайт Продовольственной и сельскохозяйственной организации Объединенных Наций. – 2017. – URL: <https://www.fao.org/3/i6874r/I6874R.pdf> (дата обращения: 11.07.2024).
17. Добровольская В.А., Мешалкина Ю.Л., Горбачева А.Ю., Романенков В.А. Обновление карты потенциала секвестрации углерода пахотными почвами Московской и Тверской областей на основе данных Росстата // Проблемы агрохимии и экологии. – 2025. – № 2. – С. 53-58.
18. Добровольская В.А., Шабалина Д.М. Оценка скоростей секвестрации углерода пахотных почв Тульской и Ростовской областей на базе различных климатических данных // Материалы Международного молодежного научного форума Ломоносов–2023в. – М.: ООО МАКС Пресс, 2023в.
19. Добровольская В.А., Шабалина Д.М., Мешалкина Ю.Л. Ключевые отличия метеоданных CRU и Terra Climate при моделировании секвестрации почвенного углерода (на примере Ростовской области) // АгроЭкоИнфо. – 2023а. – Т. 5. – № 59. – С. 1–4. – DOI: 10.51419/202135529.
20. Доклад Конференции Сторон о работе ее двадцать третьей сессии, состоявшейся в Бонне с 6 по 18 ноября 2017 г. // Рамочная конвенция об изменении климата. – Организация Объединённых Наций, 2018.
21. Докучаев П.М., Жоголев А.В., Кириллова Н.П., Козлов Д.Н., Конюшкова М.В., Лозбенев Н.И., Мартыненко И.А., Мешалкина Ю.Л., Прудникова Е.Ю., Самсонова В.П. Цифровая почвенная картография: учебное пособие. – М.: Российский университет дружбы народов, 2017. – 156 с.
22. Заварзин Г.А., Кудеяров В.Н. Почва как главный источник углекислоты и резервуар органического углерода на территории России // Вестник Российской академии наук. – 2006. – Т. 76. – № 1. – С. 14–24.
23. Иванов А.Л., Савин И.Ю., Столбовой В.С., Духанин Ю.А., Козлов Д.Н., Баматов И.М. Глобальный климат и почвенный покров – последствия для

землепользования России // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. – 2021б. – № 107. – С. 5–32. DOI: 10.19047/0136-1694-2021-107-5-32И

24. Иванов А.Л., Столбовой В.С. Инициатива «4 промилле» – новый глобальный вызов для почв России // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. – 2019. – № 98. – С. 185–202. DOI: 10.19047/0136-1694-2019-98

25. Иванов А.Л., Савин И.Ю., Столбовой В.С., Духанин Ю.А., Козлов Д.Н. Методологические подходы формирования единой Национальной системы мониторинга и учета баланса углерода и выбросов парниковых газов на землях сельскохозяйственного фонда Российской Федерации // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. – 2021а. – № 108. – С. 175–218. DOI: 10.19047/0136-1694-2021-108-175-218

26. Иванов А.Л., Савин И.Ю., Сорокина Н.П., Самсонова В.П., Мешалкина Ю.Л., Конюшкова М.В.; гл. ред. Иванов А.Л. Цифровая почвенная картография: теоретические и экспериментальные исследования: сборник статей. – М.: Почв. Инт Докучаева, 2012. – 350 с.

27. Изменение запасов органического углерода в почве на пахотных землях: методология реализации климатического проекта № 0003 // Институт глобального климата и экологии имени академика Ю.А. Израэля. – 2023.

28. Информационная система «Почвенно-географическая база данных России» [Электронный ресурс]. – URL: <https://soil-db.ru/> (дата обращения: 22.08.2025)

29. Кабо Г.Я., Блохин А.В., Симирский В.В., Ивашкевич О.А. Использование растительной биомассы для производства различных видов топлива в Республике Беларусь // Химические проблемы создания новых материалов и технологий: сб. ст. – Минск: БГУ, 2008. – №. 3.

30. Карбоновые полигоны, pilotный проект – итоги первого года: доклад. – Минобрнауки России, 2021.

31. Карпухин М.Ю., Байкин Ю.Л., Батыршина Э.Р. Анализ современного состояния агроландшафтов и пути повышения их секвестрационного потенциала

при сельскохозяйственном использовании на среднем Урале // Вестник Курганской ГСХА. – 2021. – Т. 4. – № 40. – С. 5–10. DOI: 10.52463/22274227_2021_40_3

32. Киотский протокол к Рамочной конвенции Организации Объединенных Наций об изменении климата от 11.12.1997 [Электронный ресурс] // Организация Объединенных Наций. – 1997. – URL: https://www.un.org/ru/documents/decl_conv/conventions/kyoto.shtml (дата обращения: 05.03.2024)

33. Ковда В.А., Якушев И.В. Биомасса и гумусовая оболочка суши. Биосфера и ее ресурсы. – М.: Наука, 1971. – С. 132–141.

34. Когут Б.М., Семёнов В.М. Дегумусирование и почвенная секвестрация углерода // Агрохимия. – 2021. – № 5. – С. 3–13. DOI: 10.31857/S0002188121050070

35. Когут Б.М., Семенов В.М., Артемьева З.С., Данченко Н.Н. Оценка насыщенности почвы органическим углеродом // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. – 2020. – № 102. – С. 103–124. DOI: 10.19047/0136-1694-2020-102-103-124

36. Кокорин А.О., Скуратовская Л.Н., Ханыков И.А. Изменение климата. Англо-русский словарь терминов, названий, выражений. – М.: WWF России, 2008. – 84 с.

37. Комаров А.С., Чертов О.Г., Надпорожская М.А., Припутина И.В., Быховец С.С., Ларионова А.А., Грабарник П.Я., Зудин С.Л., Михайлов А.В., Зубкова Е.В., Зудина Е.В., Шанин В.Н., Андриенко Г.З., Андриенко Н., Мартынкин А.В., Морген Ф., Абакумов Е.В., Лукьянов А.М., Кубасова Т.С., Бхатти Дж., Шоу С., Аппс М., Бобровский М.В., Ханина Л.Г., Смирнов В.Э., Глухова Е.М. Моделирование динамики органического вещества в лесных экосистемах: монография. – М.: Федеральное государственное унитарное предприятие Академический научно-издательский, производственно-полиграфический и книгораспространительский центр «Наука», 2007. – 380 с.

38. Кондратьев К.Я., Крапивин В.Ф. Моделирование глобального круговорота углерода. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2004. – 336 с.

39. Кононова М.М. Органическое вещество почв, его природа, свойства и методы изучения. – М.: Изд-во АН СССР, 1963. – 314 с.
40. Корзухин М.Д. Расчетные оценки влияния изменения климата на продуктивность лесов (обзор подходов) // Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем. – 2015. - № 2. – С. 33–58.
41. Котлярова Е.Г. Динамика органического вещества почвы в системе ландшафтного земледелия // Земледелие. – 2015. – № 3. – С. 20–24.
42. Краткий методологический комментарий к Базе данных показателей, характеризующих состояние экономики и социальной сферы муниципального образования (БД ПМО) [Электронный ресурс] // Росстат. – 2022. – URL: https://rosstat.gov.ru/storage/mediabank/met_bdpmo.htm (дата обращения: 21.05.2024)
43. Кренке А.Н. Выявление инвариантных состояния агроландшафтов на основе иерархического факторного анализа дистанционной информации // Принципы экологии. – 2020. – № 3. – С. 16—27.
44. Крыщенко В.С., Замулина И.В., Голозубов О.М., Литвинов Ю.А. История и современное состояние районирования почвенного покрова Ростовской области // Фундаментальные исследования. – 2012. – № 5–2. – С. 415–421.
45. Кулачкова С.А., Деревенец Е.Н., Сорокин А.С., Пронина В.В. Потоки парниковых газов и секвестрация углерода в агроэкосистемах с сидератами и многолетними травами на карбоновом полигоне «Чашниково». // Вестник Московского Университета. Серия 17. Почвоведение. – 2025. – № 3. – С.7-21. DOI: 10.55959/MSU0137-0944-17-2025-80-3-7-21
46. Лебедева Т.Н., Соколов Д.А., Семенов М.В., Зинякова Н.Б., Удальцов С.Н., Семенов В.М. Распределение органического углерода между структурными и процессными пулами в серой лесной почве разного землепользования // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. – 2024. – Вып. 118. – С. 79-127. DOI: 10.19047/0136-1694-2024-118-79-127

47. Левин Ф.И. Количество растительных остатков в почвах полевых культур и его определение по урожаю основной продукции // Агрохимия. – 1977. – № 8. – С. 36-43.
48. Макаров О.А., Строков А.С., Цветнов Е.В., Бондаренко Е.В., Яковлев А.С. Характеристика Учебно-опытного почвенно-экологического центра МГУ им. М.В. Ломоносова «Чашниково» // История и современное состояние научных исследований в Учебно-опытном почвенно-экологическом центре Московского университета «Чашниково». – М.: Издательский дом (типография) Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова, 2019. – С. 65–69.
49. Макеев А.О., Куст П.Г., Лебедева М.П. Почвы на московских моренах как палеогеографический архив // Пути эволюционной географии: материалы Всероссийской научной конференции посвященной памяти профессора А.А. Величко, Москва, 23–25 ноября 2016 г. – М.: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт географии Российской академии наук, 2016. – С. 613–619.
50. Матвеев Ш. Оценка точности глобальных климатических данных температур воздуха CRU TS на территории Ростовской области // Границы познания. – 2022. – Т.3. – № 80. – С. 88–92.
51. Мохов И.И. Изменения климата: причины, риски, последствия, проблемы адаптации и регулирования // Вестник Российской академии наук. – 2022. – Т. 92. – № 1. – С. 3–14. – DOI: 10.31857/S0869587322010066
52. Назаренко О.Г., Павлова Т.И., Соколова Е.А. Ростовская область. Почвенный покров, фитосанитарное состояние почв и мероприятия по их улучшению: приложение к рабочей тетради школы «Здоровье почвы». – Syngenta, 2022.
53. Овчинникова М.Ф., Барышникова Г.В. Характеристика объектов и методов исследования // История и современное состояние научных исследований в Учебно-опытном почвенно-экологическом центре Московского университета «Чашниково». – М.: Издательский дом (типография) Московского государственного университета им. М. В. Ломоносова, 2019. – С. 102.

54. Орлов Д.С., Лозановская И.Н., Попов П.Д. Органическое вещество почв и органические удобрения: учебное пособие. – М.: Издательский дом (типография) Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова, 1985. – 97 с.

55. Парижское соглашение согласно Рамочной конвенции об изменении климата от 12.12.2015 [Электронный ресурс] // Организация Объединенных Наций. – 2015. – URL:

http://unfccc.int/files/essential_background/convention/application/pdf/russian_paris_agreement.pdf (дата обращения: 14.03.2024)

56. Приказ Минобрнауки России № 74 «О полигонах для разработки и испытаний технологий контроля углеродного баланса» от 05.02.2021 [Электронный ресурс] // Официальный сайт Министерства науки и высшего образования Российской Федерации. – 2021. – URL: https://minobrnauki.gov.ru/documents/?ELEMENT_ID=30905 (дата обращения: 01.02.2024)

57. Рамочная конвенция Организации Объединенных Наций об изменении климата от 09.09.1992 [Электронный ресурс] // Официальный сайт Организации Объединённых Наций. – 1992. – URL: https://www.un.org/ru/documents/decl_conv/conventions/climate_framework_conv.shtml (дата обращения: 28.01.2024)

58. Розенберг Г.С. Глобальные модели динамики биосфера (к 100-летию со дня рождения Никиты Николаевича Моисеева) // Биосфера. – 2017. – Т. 9. – №. 2. – С. 107–122. DOI: 10.24855/BIOSFERA.V9I2.352

59. Романенков В.А., Мешалкина Ю.Л., Горбачева А.Ю., Кренке А.Н., Петров И.К., Голозубов О.М., Рухович Д.И. Карты потенциала секвестрации почвенного углерода в пахотных почвах России // Почвоведение. — 2024. — № 5. — С. 677–692. DOI: 10.31857/S0032180X24050037

60. Романенков В.А., Романенко И.А., Рухович Д.И., Королева П.В., Сиротенко О.Д., Шевцова Л.К. Прогноз динамики запасов органического углерода пахотных земель Европейской территории России. – М.: ВНИИА, 2009. – 95 с.

61. Романенков В.А., Мешалкина Ю.Л., Горбачева А.Ю., Добровольская В.А., Кренке А.Н. Прогноз динамики запасов углерода в почвах возделываемых земель Европейской России в контексте стратегии низкоуглеродного развития // Известия Российской академии наук. Серия географическая. – 2023. – Т. 87. – № 4. – С. 584–596. DOI: 10.31857/S2587556623040106
62. Романенков В.А., Мешалкина Ю.Л., Горбачева А.Ю., Кренке А.Н., Петров И.К., Голозубов О.М., Рухович Д.И. Управление запасами углерода сельскохозяйственных земель Европейской территории России для достижения углеродной нейтральности // Импортозамещение, научно-техническая и экономическая безопасность: сборник статей V Международной научно-технической конференции «Минские научные чтения-2022», Минск, 7–9 декабря 2022 г. – Минск: Белорусский государственный технологический университет, 2022. – Т. 3. – С. 164–168.
63. Романовская А.А. Основы мониторинга антропогенных эмиссий и стоков парниковых газов (CO_2 , N_2O , CH_4) в животноводстве, при сельскохозяйственном землепользовании и изменении землепользования в России: автореф. дис. ... доктора биологических наук: 03.00.16 / Анна Анатольевна Романовская. – М.: 2008. - 42 с.
64. РСТ РСФСР 384-83 Солома зерновых, крупяных, зернобобовых культур и трав. Технические условия. – М.: ГОСПЛАН РСФСР, 1983. – 5 с.
65. Руководство по переходу к устойчивым агропродовольственным системам [Электронный ресурс] // 2018. – URL: <http://www.fao.org/3/I9037ru/i9037ru.pdf> (дата обращения: 18.06.2024)
66. Рыжова И.М. Анализ устойчивости почв на основе теории нелинейных динамических систем // Почвоведение. – 2003. – № 5. – С. 583–590.
67. Рыжова И.М. Проблемы и перспективы моделирования динамики органического вещества почв // Агрохимия. – 2011. – № 12. – С. 71–80.
68. Рыжова И.М., Романенков В.А., Степаненко В.М. Современное развитие моделей динамики органического вещества почв (обзор) // Вестник

Московского университета. Серия 17: Почвоведение. — 2024. — Т. 79, № 4. — С. 122–129.

69. Савин И.Ю., Жоголев А.В., Прудникова Е.Ю. Современные тренды и проблемы почвенной картографии // Почвоведение. — 2019. — № 5. — С. 517–528. DOI: 10.1134/S0032180X19050101

70. Самсонова В.П., Мешалкина Ю.Л., Добровольская В.А., Кондрашкина М.И., Дядькина С.Е., Филиппова О.И., Кротов Д.Г., Морозова Т.М., Красильников П.В. Исследование неопределенности оценок запасов органического углерода в масштабах угодий // Почвоведение. — 2023. — № 11. — С. 1437–1449. DOI: 10.31857/S0032180X23600725

71. Самсонова В.П. Пространственная изменчивость почвенных свойств: на примере дерново-подзолистых почв. — Москва: URSS. — 2008. — 156 с.

72. Сафонова Т.И., Соколова И.В. Моделирование динамики органического вещества почв // Научное обеспечение агропромышленного комплекса: сборник статей по материалам 72-й научно-практической конференции преподавателей по итогам НИР за 2016 г., Краснодар, 29 марта 2017 г. — Краснодар: Кубанский государственный аграрный университет имени И.Т. Трубилина, 2017. — С. 42–43.

73. Семёнов В.М., Ходжаева А.К. Агроэкологические функции растительных остатков в почве // Агрохимия. — 2006. — № 7. — С. 63–81.

74. Семёнов В.М., Когут Б.М., Иванов А.Л. Почвенная секвестрация углерода в агроландшафтах: продовольственный императив климатической повестки // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. — 2025. — Вып. 124. — С. 10-69. DOI: 10.19047/0136-1694-2025-124-10-69

75. Семёнов В.М., Тулина А.С., Семёнова Н.А., Иванникова Л.А. Гумификационные и негумификационные пути стабилизации органического вещества в почве (обзор) // Почвоведение. — 2013. — № 4. — С. 393. DOI 10.7868/S0032180X13040114

76. Семёнов В.М., Лебедева Т.Н., Лопес де Гереню В.О., Овсепян Л.А., Семенов М.В., Курганова И.Н. Пулы и фракции органического углерода в почве:

структурой, функции и методы определения // Почвы и окружающая среда. – 2023. – № 6(1). С. e199. DOI: 10.31251/pos.v6i1.199

77. Семёнов С.П., Ташкин А.О. Анализ моделей углеродного цикла применительно к исследованию болотных экосистем Западной Сибири // Вестник Югорского государственного университета. – 2022а. – Т. 4. – № 67. – С. 145–152. DOI: 10.18822/byusu202204145-152

78. Семёнов С.М., Гладильщикова А.А. Сценарии антропогенных изменений климатической системы в XXI веке // Фундаментальная и прикладная климатология. – 2022б. – Т. 8. – № 1. – С. 75–106. DOI: 10.21513/2410-8758-2022-1-75-106

79. Смагин А.В., Садовникова И.Б., Смагина М.В., Глаголев М.В., Шевченко Н.М., Хайдамова Д.Д., Губер Л.К. Моделирование динамики органического вещества почв. – М.: Изд-во МГУ, 2001. – 120 с.

80. Специальный доклад МГЭИК об изменении климата, опустынивании, деградации земель, устойчивом управлении земельными ресурсами, продовольственной безопасности и потоках парниковых газов в наземных экосистемах: резюме для политиков / под ред. П.Р. Шукла, Д.Ски, Э.Кальво Буэндия, В.Массон-Дельмотт, Х.- О. Пёртнер, Д.С. Робертс, П. Чжай, Р. Слейд, С. Коннорс, Р. ван Диемен, М. Ферра, И. Хоги, С. Луз, С. Неоги, М. Патхак, Я. Петцхольд, Дж. Португал Перейра, П. Вьяс, Э. Хантли, К. Киссик, М. Белкасеми, Дж. Мэйли. – МГЭИК, 2019.

81. Столбовой В.С. Регенеративное земледелие и смягчение изменений климата // Достижения науки и техники АПК. – 2020. – Т. 34. – № 7. – С. 19–26. DOI: 10.24411/0235-2451-2020-10703

82. Строков А.С., Романовская А.А., Вертянкина В.Ю., Рябов И.Ю. Оценка запасов углерода и компонентов углеродного следа балансовым методом на пахотных землях регионов России // Метеорология и гидрология – 2023. – № 10. – С. 5–15. DOI: 10.52002/0130-2906-2023-10-5-15

83. Суховеева О.Э., Карелин Д.В. Параметризация модели DNDC для оценки компонентов биогеохимического цикла углерода на европейской

территории России // Вестник Санкт-Петербургского университета. Науки о Земле. – 2019. – № 64 (2). – С. 363–384. DOI: 10.21638/spbu07.2019.211

84. Суховеева О.Э. Поступление органического углерода в почву с послеуборочными остатками сельскохозяйственных культур // Почвоведение. – 2022. – № 6. – С. 737-746. – DOI 10.31857/S0032180X22060120. – EDN BEBVWH

85. Суховеева О.Э. Приложение модели DNDC к оценке параметров углеродного и азотного обмена в пахотных почвах Нечерноземья // Известия Российской академии наук. Серия географическая – 2018. – № 2. – С. 74–85.

86. Тарко А.М. Математическая модель глобального цикла углерода в биосфере // Журнал общей биологии. – 2010. – Т. 71. – № 1. – С. 97–109.

87. Титлянова А.А. Универсальность процессов биотического круговорота // Почвоведение. – 2014. – №. 7. – С. 771–771. DOI: 10.7868/s0032180x14050220

88. Титлянова А.А., Базилевич Н.И., Снытко В.А. и др. Биологическая продуктивность травяных экосистем. Географические закономерности и экологические особенности. 2-е издание, исправленное и дополненное – Новосибирск: ИПА СО РАН, 2018. 110 с.

89. Третий оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации: общее резюме. – СПб.: Наукоемкие технологии, 2022. – 124 с.

90. Третьяков Е.В., Стратичук Д.А. Развитие карбоновых полигонов в России // Digital. – 2022. – Т. 3. – №. 2. – С. 72–76.

91. Урусевская И.С. Карта почвенно-экологического районирования Российской Федерации. Масштаб 1:8 000 000. Пояснительный текст и легенда к карте: Учебное пособие // Москва. – 2020. — 100 с.

92. Файкин Г.М., Степаненко В.М., Медведев А.И., Шангареева С.К., Рыжова И.М., Романенков В.А., Хусниев И.Т. Конструктор динамических моделей углеродногоцикла почвы // Вычислительные методы и программирование. 2025.26, № 3. 281–303. DOI: 10.26089/NumMet.v26r320

93. Чернова О.В., Голозубов О.М., Алябина И.О., Щепашенко Д.Г. Комплексный подход к картографической оценке запасов органического углерода

в почвах России // Почвоведение. – 2021. – № 3. – С. 273–286. DOI: 10.31857/S0032180X21030047

94. Чертов О.Г., Комаров А.С. Теоретические подходы к моделированию динамики содержания органического вещества почв // Почвоведение. – 2013. – № 8. – С. 937. DOI: 10.7868/S0032180X13080017

95. Шеин Е.В., Рыжова И.М. Математическое моделирование в почвоведении: учебник. – М.: «ИП Маракушев А.Б.», 2016. – 377 с.

96. Шестой оценочный доклад Межправительственной группы экспертов по изменению климата: резюме для политиков / под ред. В. Массон-Дельмотт, П. Чжай, А. Пирани, С.Л. Коннорс, К. Пеан, Я. Чжень, Л. Гольдфарб, М.И. Тигнор, Дж.Б. Мэтьюз, С. Бергер, М. Хуан, О. Елекчи, Р.Ю, Б. Чжоу, Э. Лонной, Т.К. Мэйкок, Т. Уотерфилд, К. Лейцелл, Н. Кауд // Межправительственная группа экспертов по изменению климата. – 2021.

97. Хомяков Д.М., Азиков Д.А. Продовольственная безопасность: устойчивость сельского хозяйства в условиях изменения климата // Использование и охрана природных ресурсов в России. — 2023. — № 4. — С. 12.

98. Хусниев И.Т., Романенков В.А., Ситников В.Н., Есаулко А.Н., Голосной Е.В. Моделирование динамики запасов органического углерода почвы в длительном полевом опыте на выщелоченном черноземе в Ставропольском крае // Проблемы агрохимии и экологии. – 2023. – №4. DOI: 10.26178/AE.2023.22.45.003.

99. Albers C.N., Banta G.T., Jacobsen O.S., Hansen P.E. Characterization and structural modelling of humic substances in field soil displaying significant differences from previously proposed structures // Eur. J. Soil Science. – 2008. – V. 59. – № 4.– P. 693–705. DOI: 10.1111/j.1365-2389.2008.01036.x

100. Amelung W., Bossio D., de Vries W., Kögel-Knabner I., Lehmann J., Amundson R., Bol R., Collins C., Lal R., Leifeld J., Minasny B., Pan G., Paustian K., Rumpel C., Sanderman J., van Groenigen J.W., Mooney S., van Wesemael B., Wander M., Chabbi A. Towards a global-scale soil climate mitigation strategy // Nature Communications. – 2020. – Vol.11. – № 1. – P. 1–10. DOI: 10.1038/s41467-020-18887-7

101. Bartsev S.I., Degermendzhi A.G., Erokhin D.V. Principle of the worst scenario in the modelling past and future of biosphere dynamics // *Ecol Modelling.* – 2008. – Vol. 216. – № 2. – P. 160–171. DOI: 10.1016/j.ecolmodel.2008.03.002
102. Batjes N.H. Total carbon and nitrogen in the soils of the world // *European Journal of Soil Science.* – 1996. – Vol. 47. – P. 151–163. DOI: 10.1111/j.1365-2389.1996.tb01386.x
103. Bjorkstrom A.A. A model of CO₂ interaction between atmosphere, ocean and land biota // *Global Carbon Cycle. SCOPE–13.* – 1979. – P. 403–458.
104. Blanco-Canqui H., Lal R. Crop residue management and soil carbon dynamics // *Soil carbon sequestration and the greenhouse effect.* – 2009. – Vol. 57. – P. 291–310.
105. Boden T.A., Keiser D.P., Sepanski R.J., Stoss F.W., Logsdon G.M. Trends '93: A Compendium of Data on Global Change. – 1994. DOI: 10.2172/10106351
106. Boussingault J.B. Recherche sur la composition de l'atmosphère // *Ann. Chim. Phys.* – 1834. – № 57. – P. 148–182.
107. Brongniard A. Considérations sur la nature des végétaux qui ont couvert la surface de la Terre aux diverses époques de sa formation // *C.R. Acad. Sci. Paris,* 1828.
108. Cabral L., Rainey E., Glover D. Agroecology, Regenerative Agriculture, and Nature-Based Solutions. Competing Framings of Food System Sustainability in Global Policy and Funding Spaces // *Smoke & Mirrors.* – 2022.
109. Campbell E., Paustian K. Current developments in soil organic matter modeling and the expansion of model applications: a review // *Environmental Research Letters.* – 2015. – Vol. 10. – № 12. – P. 123004. DOI: 10.1088/1748-9326/10/12/123004
110. Carbon Transformation and Transport in Soil [Иллюстрация] // U.S. Department of Energy Office of Biological and Environmental Research. – 2015. – URL: https://public.ornl.gov/site/gallery/originals/Carbon_Transformation.jpg (дата обращения: 14.03.2024)
111. Cheng L., Abraham J., Jiang Zhu J., Trenberth K. E., Fasullo J., Boyer T., Locarnini R., Zhang B., Yu F., Wan L., Chen X., Song X., Liu Y., Mann M. E. Record-

setting Ocean warmth continued in 2019 // Adv. Atmos. Sci. – 2020. – Vol. 37. – P. 137–142.

112. Coleman K., Jenkinson D.S. RothC-26.3. A model for the turnover of carbon in soil // Evaluation of soil organic matter models using existing, long-term datasets. NATO ASI series I. – 1996. – Vol. 38. – P. 237–246. DOI: 10.1007/978-3-642-61094-3_17

113. Dobrovolskaya V.A., Meshalkina J.L., Gorbacheva A.Y., Romanenkov V.A. Map of carbon sequestration potential by arable soils of the Rostov region, updated using Rosstat data // Moscow University Soil Science Bulletin. – 2024. – Vol. 7. – № 5. – P. 639–646. DOI: 10.3103/S0147687424700625

114. Ebelmen J. J. Recherches sur la décomposition des roches // C. R. Acad. Sci. Paris. – 1848. – Vol. 26.

115. Ebelmen J.J. Sur la décomposition des roches // Ann. des Mines. – 1847. – Vol. 4. – P. 627–654.

116. Ebelmen J.J. Sur les produits de la décomposition des espèces minérales de la famille des silicates // Ann. des Mines. – 1845. – Vol. 7. – P. 3–66.

117. Galvez M.E., Gaillardet J. Historical constraints on the origins of the carbon cycle concept // Comptes Rendus. Géoscience. – 2012. – Vol. 344. – № 11–12. – P. 549–567. DOI: 10.1016/j.crte.2012.10.006

118. Global Food-and-Water Security-support Analysis Data (GFSAD) [Электронный ресурс] // USGS. – 2023. – URL: <https://www.usgs.gov/centers/western-geographic-science-center/science/global-food-and-water-security-support-analysis> (дата обращения: 14.03.2024)

119. Global Soil Organic Carbon Sequestration Potential Map – SOCseq v.1.1.: technical report. – Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2022. – 179 p. DOI: 10.4060/cb9002en

120. Gorbacheva A.Y., Meshalkina J.L., Shabalina D.M., Dobrovolskaya V.A., Antonova S.A., Romanenkov V.A. Sensitivity analysis of the model RothC using two climatic datasets: a case study of arable soils in the Rostov region // Moscow University

Soil Science Bulletin. – 2024. – Vol. 79. – № 5. – P. 656–663. DOI: 10.3103/S0147687424700649

121. Grassland carbon sequestration: management, policy and economics / M. Abberton, R. Conant, C. Batello (eds.). – Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2009. – 338 p.
122. Guttières R., Nunan N., Raynaud X., Lacroix G., Barot S., Barré P., Girardin C., Guenet B., Lata J.-C., Abbadie L. Temperature and soil management effects on carbon fluxes and priming effect intensity // Soil Biology and Biochemistry. – 2021. – V. 153. – P. 108103. DOI: 10.1016/j.soilbio.2020.108103
123. Hansen J., Sato M., Kharecha P., Beerling D., Berner R., Masson-Delmotte V., Pagani M., Raymo M., Royer D.L., Zachos J.C. Target atmospheric CO₂: Where should humanity aim? // Open Atmos. Sci.J. – 2008. – Vol. 2. – P. 217–231. DOI: 10.2174/1874282300802010217
124. Harden J.W., Hugelius G., Ahlstrom A., Blankinship J.C., Bond-Lamberty B., Lawrence C.R., Loisel J., Malhotra A., Jackson R.B., Ogle S., Phillips C., Ryals R., Todd-Brown K., Vargas R., Vergara S.E., Cotrufo M.F., Keiluweit M., Heckman K.A., Crow S.E., Silver W.L., DeLonge M., Nave L.E. Networking our science to characterize the state, vulnerabilities, and management opportunities of soil organic matter // Glob. Change Biol. – 2018. – Vol. 24. – P. 705–718. DOI: 10.1111/gcb.13896
125. Harris N.L., Brown S., Hagen S.C., Saatchi S.S., Petrova S., Salas W., Hansen M.C., Potapov P.V., Lotsch A. Baseline map of carbon emissions from deforestation in tropical regions // Science. – 2012. – Vol. 336. – P. 1573–1576. DOI: 10.1126/science.1217962
126. Harris I., Osborn T.J., Jones P., Lister D. Version 4 of the CRU TS monthly high-resolution gridded multivariate climate dataset // Sci Data. – 2020. – Vol. 7. – № 109. DOI: 10.1038/s41597-020-0453-3
127. IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories / H.S. Eggleston, L. Buendia, K. Miwa, T. Ngara, K. Tanabe (eds) // The Intergovernmental Panel on Climate Change. – Hayama: Institute for Global Environmental Strategies, 2006.

128. Jenkinson D.S. The turnover of organic-carbon and nitrogen in soil // Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B: Biological Sciences. – 1990. – Vol. 329. – № 1255. – P. 361–368.
129. Jenkinson D.S., Rayner J.H. The turnover of soil organic matter in some of the Rothamsted classical experiments // Soil Science. – 1977. – Vol. 123. – № 5. – P. 298–305. DOI: 10.1097/00010694-197705000-00005
130. Kondratyev K.Y., Krapivin V.F., Varotsos C.A. Global Carbon Cycle and Climate Change. – Berlin: Springer Science & Business Media, 2003. – 324 p.
131. Kondratyev K.Y., Krapivin V.F., Varotsos C.A. Natural Disasters as Interactive Components of Global Ecodynamics // Natural Disasters as Interactive Components of Global-Ecodynamics. – Chichester: Springer/Praxis, 2006. – P. 437–478. DOI: 10.1007/3-540-37714-X_8
132. Lal R., Smith P., Jungkunst H., Mitsch W., Lehmann J., Nair P., McBratney A., de Moraes Sá J.C., Schneider J., Zinn Y.L., Skorupa A.L.A., Zhang H.-L., Minasny B., Srinivasrao Ch., Ravindranath N.H. The carbon sequestration potential of terrestrial ecosystems // Journal of Soil and Water Conservation. – 2018. – Vol. 73. – № 6. – P. 145A–152A.
133. Land Use, Land Use Change, and Forestry: IPCC Special Report / R.T. Watson, I.R. Noble, B. Bolin, N.H. Ravindranath, D.J. Verardo, D.J. Dokken (eds.). – Cambridge: Cambridge University Press, 2000. – 375p.
134. Lavalée J.M., Soong J.L., Cotrufo M.F. Conceptualizing soil organic matter into particulate and mineral-associated forms to address global change in the 21st century // Glob Chang Biol. – 2020. – Vol. 26(1). – P. 261–273. DOI: 10.1111/gcb.14859
135. Liu T., Wang Q., Su B. A review of carbon labeling: Standards, implementation, and impact // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2016. – Vol. 53. – P. 68–79. DOI: 10.1016/j.rser.2015.08.050
136. Minasny B., Malone B.P., McBratney A.B., Angers D.A., Arrouays D., Chambers A., Chaplot V., Chen Z.S., Cheng K., Das B.S., Field D.J., Gimona A., Hedley C.B., Hong S.Y., Mandal B., Marchant B.P., Martin M., McConkey B.G., Mulder V.L., O'Rourke S., Richer-de-Forges A.C., Odeh I., Padarian J., Paustian K., Pan G., Poggio

L., Savin I., Stolbovoy V., Stockmann U., Sulaeman Y., Tsui C.C., Vågen T.G., van Wesemael B., Winowiecki L. Soil carbon 4 per mille // *Geoderma*. – 2017. – Vol. 292. – P. 59-86. DOI: 10.1016/j.geoderma.2017.01.002

137. Modeling the primary productivity of the world / H. Lieth, R. H. Whittaker (eds.) // Primary productivity of the biosphere. – Berlin: Springer, 1975. – P. 237–263. DOI: 10.1007/978-3-642-80913-2_12

138. Paustian K., Larson E., Kent J., Marx E., Swan A. Soil C sequestration as a biological negative emission strategy // *Front. Clim.* – 2019a. – Vol. 1. – № 8. DOI: 10.3389/fclim.2019.00008

139. Paustian K., Collier S., Baldock J., Burgess R., Creque J., DeLonge M., Dungait J., Ellert B., Frank S., Goddard T., Govaerts B., Grundy M., Henning M., Izaurralde R. C., Madaras M., McConkey B., Porzig E., Rice Ch., Searle R., Seavy N., Skalsky R., Mulhern W., Jahn M. Quantifying carbon for agricultural soil management: from the current status toward a global soil information system // *Carbon Management*. – 2019b. – Vol. 10. – № 6. – P. 567–587. DOI: 10.1080/17583004.2019.1633231

140. Peralta G., Di Paolo L., Luotto I., Omuto C., Mainka M., Viatkin K., Yigini Y. Global soil organic carbon sequestration potential map (GSOCseq v1.1): technical manual. – Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2022. – 255 p. DOI: 10.4060/cb2642en

141. Poggio L., de Sousa L. M., Batjes N.H., Heuvelink G.B., Kempen B., Ribeiro E., Rossiter D. SoilGrids 2.0: producing soil information for the globe with quantified spatial uncertainty // *Soil*. – 2021. – Vol. 7. – № 1. – P. 217–240. DOI: 10.5194/soil-7-217-2021

142. Rhodes C. The Imperative for Regenerative Agriculture // *Science Progress*. – 2017. – Vol. 100. – P. 80-129. DOI: 10.3184/003685017X14876775256165

143. Romanenkov V., Belichenko M., Petrova A., Raskatova T., Jahn G., Krasilnikov P. Soil organic carbon dynamics in long-term experiments with mineral and organic fertilizers in Russia // *Geoderma Regional*. – 2019. – Vol. 17. – P. e0022. DOI: 10.1016/j.geodrs.2019.e00221

144. Schulten H.R., Leinweber P. New insights into organic–mineral particles: composition, properties and models of molecular structure // *Biology Fertility Soils*. – 2000. – Vol. 30. – P. 399–432. DOI: 10.1007/s003740050020
145. Schreefel L., Schulte R.P.O., de Boer I.J.M., Pas Schrijver A., van Zanten H.H.E. Regenerative agriculture—the soil is the base // *Global Food Security*. – 2020. – Vol. 26. – P. 100404. DOI: 10.1016/j.gfs.2020.100404
146. Sims N.C., Newnham G.J., England J.R., Guerschman J., Cox S.J.D., Roxburgh S.H., Viscarra Rossel R.A., Fritz S., Wheeler I. Good practice guidance. SDG indicator 15.3. 1, proportion of land that is degraded over total land area. Version 2.0. – Bonn: United Nations Convention to Combat Desertification, 2021.
147. Six J., Conant R., Paul E., Paustian K. Stabilization mechanisms of soil organic matter: implications for C-saturation of soils // *Plant and Soil*. – 2002. – Vol. 241. – № 2. – P. 155–176.
148. Smith J.O., Smith P., Wattenbach M., Zaehle S., Hiederer R., Jones R.J.A., Montanarella L., Rounsevell M.D.A., Reginster I., Ewert F. Projected changes in mineral soil carbon of European croplands and grasslands, 1990–2080 // *Global Change Biology*. – 2005. – Vol. 11. – № 12. – P. 2141–2152. DOI: 10.1111/j.1365-2486.2005.001075.x
149. Sollins P., Homann P., Caldwell B.A. Stabilization and destabilization of soil organic matter: mechanisms and controls // *Geoderma*. – 1996. – Vol. 74. – № 1–2. – P. 65–105. DOI: 10.1016/s0016-7061(96)00036-5
150. Stolbovoy V. Carbon in Russian soils // *Climatic Change*. – 2002a. – Vol. 55. – № 1–2. – P. 131–156.
151. Stolbovoy V. Carbon in agricultural soils of Russia // *Soil Organic Carbon And Agriculture: Developing Indicators For Policy Analyses*. Proceedings of an OECD expert meeting, Ottawa Canada / C.A.S. Smith (Ed.). – Ottawa, 2002b. – P. 301–6.
152. Summary for policymakers. Climate change and land: an IPCC special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems / P.R. Shukla, J. Skea, E. Calvo Buendia, V. Masson-Delmotte, H.- O. Pörtner, D.C. Roberts, P. Zhai, R. Slade, S. Connors, R. van Diemen, M. Ferrat, E. Haughey, S. Luz, S. Neogi, M. Pathak, J.

Petzold, J. Portugal Pereira, P. Vyas, E. Huntley, K. Kissick, M. Belkacemi, J. Malley, (eds.). – Cambridge: Cambridge University Press, 2019. – 34 p. DOI: 10.1017/9781009157988.001

153. Tirez K., Vanhoof C., Siegfried H., Deprost P., Swerts M., Joost S. Estimating the Contribution of Sampling. Sample Pretreatment and Analysis in the Total Uncertainty Budget of Agricultural Soil pH and Organic Carbon Monitoring // Communications in Soil Science and Plant Analysis. – 2014. – № 45:7. – P. 984-1002. DOI: 10.1080/00103624.2013.867056

154. Vernadsky M.I. La Géochimie. – Paris: F. Alcan, 1924. – 404 p.

155. Von Lützow M., Kögel-Knabner I., Ludwig B., Matzner E., Flessa H., Ekschmitt K., Guggenberger G., Marschner B., Kalbitz K. Stabilization mechanisms of organic matter in four temperate soils: development and application of a conceptual model // J. Plant Nutr. and Soil Sci. – 2008. – V. 171. – P. 111–124. DOI: 10.1002/jpln.200700047

156. Wander M. Soil Organic Matter Fractions and Their Relevance to Soil Function; F. Magdoff, R.R. Weil (eds.) // Soil organic matter in sustainable agriculture. – CRC Press, 2004. – P. 67. DOI: 10.1201/9780203496374.ch3

157. Wu J., Brookes P.C. The proportional mineralization of microbial biomass and organic matter caused by air drying and rewetting of a grassland soil // Soil Biol. And Biochem. – 2005. – Vol. 37. – P. 507–515. DOI: 10.1016/j.soilbio.2004.07.043

158. Zhang Y., Zhang J., Liang Y., Li H., Chen X., Zhao P., Jiang Z., Zou D., Liu X., Liu J. Carbon sequestration processes and mechanisms in coastal mariculture environments in China // Sci. China Earth Sci. – 2017. – Vol. 60. – P. 2097–2107. DOI: 10.1007/s11430-017-9148-7

ПРИЛОЖЕНИЯ

Приложение 1

Методика расчёта чистой первичной продукции по данным Росстата на уровне области

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИМЕНИ М.В.ЛОМОНОСОВА»
ФАКУЛЬТЕТ ПОЧВОВЕДЕНИЯ**

**ВАЖНЕЙШИЙ ИННОВАЦИОННЫЙ ПРОЕКТ
ГОСУДАРСТВЕННОГО ЗНАЧЕНИЯ
«ЕДИНАЯ НАЦИОНАЛЬНАЯ СИСТЕМА МОНИТОРИНГА
КЛИМАТИЧЕСКИ АКТИВНЫХ ВЕЩЕСТВ»**



МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО РАСЧЕТУ ЧИСТОЙ ПЕРВИЧНОЙ ПРОДУКЦИИ (НРР) НА ТЕРРИТОРИИ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ УГОДИЙ ПО ДАННЫМ ОФИЦИАЛЬНОЙ СТАТИСТИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ

Составители: Добровольская В.А., Мешалкина Ю.Л., Романенков В.А.

Москва
2024

Биомасса полевых культур и уравнения регрессии для определения растительных остатков по урожаю основной продукции

Культуры	Биомасса, ц/га				Уравнение регрессии для определения массы		
	Урожай (основная продукция)	Побочная продукция (солома, ботва)	Поверхностные остатки	Корни	Побочной продукции	Поверхностных остатков	Корней
Озимая рожь	10-25	22-50	6,5-11	16-26	$x = 1,8y + 3,8$	$x = 0,3y + 3,2$	$x = 0,6y + 8,9$
		26-40	51-65	11,1-13,8	$x = 1,0y + 25$	$x = 0,2y + 6,3$	$x = 0,6y + 13,9$
Озимая пшеница	10-25	20-45	6,5-12	15-28	$x = 1,7y + 3,4$	$x = 0,4y + 2,6$	$x = 0,9y + 5,8$
		26-40	46-57	12,1-13,5	$x = 0,8y + 25,9$	$x = 0,1y + 8,9$	$x = 0,7y + 10,2$
Яровая пшеница	10-20	17-30	6-9	14-22	$x = 1,3y + 4,2$	$x = 0,4y + 1,8$	$x = 0,8y + 6,5$
		21-30	31-35	9,1-10,8	$x = 0,5y + 19,8$	$x = 0,2y + 5,4$	$x = 0,8y + 6$
Ячмень	10-20	15-24	6-9,5	14-22	$x = 0,9y + 6,5$	$x = 0,4 + 1,8$	$x = 0,8y + 6,5$
		21-35	25-39	9,6-10,8	$x = 0,9y + 7,2$	$x = 0,09y + 7,6$	$x = 0,4y + 13,4$
Овес	10-20	14-29	6-8,8	12-22	$x = 1,5y - 1,2$	$x = 0,3y + 3,2$	$x = 1,0y + 2$
		21-35	31-42	9-11,2	$x = 0,7y + 16,2$	$x = 0,15y + 6,1$	$x = 0,4y + 16$
Просо	5-20	12-34	6-9	10-22	$x = 1,5y + 4,5$	$x = 0,2y + 5$	$x = 0,8y + 7$
		21-30	36-54	9,3-12	$x = 2,0y - 7,1$	$x = 0,3y + 3,3$	$x = 0,56y + 11,2$
Кукуруза на зерно	10-35	30-60	6-12	15-34	$x = 1,2y + 17,5$	$x = 0,23y + 3,5$	$x = 0,8y + 5,8$
Горох	5-20	11-30	4-6	10-20	$x = 1,3y + 4,5$	$x = 0,14y + 3,5$	$x = 0,66y + 7,5$
		22-30	31-40	6,5-8	$x = 1,2y + 3$	$x = 0,20y + 1,7$	$x = 0,37y + 12,9$
Гречиха	5-15	13-30	5,5-8	11-22	$x = 1,7y + 4,7$	$x = 0,25y + 4,3$	$x = 1,1y + 5,3$
		16-30	31-50	8,1-11	$x = 1,3y + 10,3$	$x = 0,2y + 5,2$	$x = 0,54y + 14,1$
Подсолнечник	8-30	20-60	7-15	15-38	$x = 1,8y + 5,3$	$x = 0,4y + 3,1$	$x = 1,0y + 6,6$
Картофель	50-200	8-27	3-9	8-20	$x = 0,12y + 2$	$x = 0,04y + 1$	$x = 0,08y + 4$
		201-360	28-44	10-13	$x = 0,1y + 3,9$	$x = 0,03y + 4,1$	$x = 0,06y + 8,6$

Сахарная свекла	100-200	12-26	1,5-3	10-17	$x = 0,14y - 1,7$	$x = 0,02y + 0,8$	$x = 0,07y + 3,5$
	201-400	30-50	3-3,5	18-30	$x = 0,1y + 10$	$x = 0,003y + 2,8$	$x = 0,06y + 5,4$
Овощи	50-200	6,5-24	2,5-5	8-16	$x = 0,12y + 0,5$	$x = 0,02y + 1,5$	$x = 0,06y + 5$
	250-400	30-48	5,1-6	17-22	$x = 0,12y + 0,0$	$x = 0,006y + 3,6$	$x = 0,04y + 6$
Кормовые корнеплоды	50-200	4,5-17	1,5-3	8-15	$x = 0,08y + 0,1$	$x = 0,01y + 1$	$x = 0,05y + 5,5$
	200-400	18-40	3-3,5	16-26	$x = 0,11y - 4,6$	$x = 0,003y + 2,4$	$x = 0,05y + 5,2$
Лен	3-10	30-65	—	13-22	$x = 5y + 15$	—	$x = 1,3y + 9,4$
Конопля	3-10	45-80	—	15-30	$x = 5y + 30$	—	$x = 2,2y + 9,1$
Силосные (без кукурузы)	100-200	—	8-12	16-26	—	$x = 0,04y + 4$	$x = 0,09y + 7$
Кукуруза на силос	100-200	—	6,2-8,8	21-33	—	$x = 0,03y + 3,6$	$x = 0,12y + 8,7$
	201-350	—	9-12	33-45	—	$x = 0,02y + 5$	$x = 0,08y + 16,2$
Однолетние травы (вика, горох+овес)	10-40	—	7-11	15-35	—	$x = 0,13y + 6$	$x = 0,7y + 7,5$
Многолетние травы	10-40	—	8-14	18-42	—	$x = 0,2y + 6$	$x = 0,8y + 11$
	30-60	—	13-16	45-75	—	$x = 0,1y + 10$	$x = 1y + 15$

Чистая первичная продукция (NPP), оцененная по климатическим данным (модель ФАО) и по статистическим данным по урожайности и посевным площадям для конкретных районов (данные Росстата) для районов Московской области, т С га/год

N	Районы Московской области	Модель MIAMI	Данные Росстат	Разность ДР - MIAMI
1	Балашихинский	4,94	5,40	0,46
2	Волоколамский	4,93	5,75	0,82
3	Воскресенский	4,84	5,81	0,97
4	Дмитровский	4,91	7,51	2,60
5	Домодедовский	4,99	5,71	0,72
6	Егорьевский	4,72	4,43	-0,29
7	Зарайский	4,74	3,58	-1,16
8	Истринский	4,95	5,59	0,64
9	Каширский	4,87	4,02	-0,85
10	Клинский	4,90	5,41	0,51
11	Коломенский	4,81	5,58	0,77
12	Ленинский	5,01	8,70	3,69
13	Лотошинский	4,90	4,54	-0,36
14	Луховицкий	4,70	5,21	0,51
15	Можайский	4,95	4,14	-0,81
16	Наро-Фоминский	5,03	4,24	-0,79
17	Ногинский	4,86	6,28	1,42
18	Озерский	4,83	7,23	2,40
19	Орехово-Зуевский	4,77	5,75	0,98
20	Павлово-Посадский	4,82	5,79	0,97
21	Пушкинский	4,89	6,79	1,90
22	Раменский	4,91	6,03	1,12
23	Рузский	4,96	3,60	-1,36
24	Сергиево-Посадский	4,83	4,83	0,00
25	Серебряно-Прудский	4,76	3,48	-1,28
26	Серпуховский	5,01	5,34	0,33
27	Солнечногорский	4,93	5,06	0,13
28	Ступинский	4,93	4,22	-0,71
29	Талдомский	4,85	4,97	0,12
30	Чеховский	5,04	6,32	1,28
31	Шатурский	4,69	5,54	0,85
32	Шаховской	4,90	4,22	-0,68
33	Щелковский	4,86	4,47	-0,39

Чистая первичная продукция (NPP), оцененная по климатическим данным (модель ФАО) и по статистическим данным по урожайности и посевным площадям для конкретных районов (данные Росстата) для районов Ростовской области, т С га/год

N	Районы Ростовской области	Модель MIAMI	Данные Росстат	Разность Данные Росстата - MIAMI
1	Азовский	4.77	4.81	0.04
2	Аксайский	4.76	4.01	-0.74
3	Багаевский	4.59	5.16	0.56
4	Белокалитвинский	4.13	3.14	-0.98
5	Боковский	3.85	2.67	-1.18
6	Верхнедонской	3.91	2.85	-1.06
7	Веселовский	4.42	4.63	0.21
8	Волгодонской	3.91	3.74	-0.17
9	Дубовский	3.53	3.11	-0.42
10	Егорлыкский	4.71	3.96	-0.76
11	Заветинский	3.22	2.02	-1.20
12	Зерноградский	4.66	4.60	-0.06
13	Зимовниковский	3.68	4.14	0.46
14	Кагальницкий	4.81	4.82	0.01
15	Каменский	4.25	3.41	-0.84
16	Кашарский	3.92	3.42	-0.51
17	Константиновский	4.08	3.98	-0.10
18	Красносулинский	4.43	3.41	-1.02
19	Куйбышевский	4.57	4.69	0.12
20	Мартыновский	4.07	4.08	0.01
21	Матвеево-Курганский	4.52	4.50	-0.02
22	Миллеровский	4.09	3.30	-0.80
23	Милютинский	3.85	2.95	-0.90
24	Морозовский	3.83	3.31	-0.52
25	Мясниковский	4.71	5.09	0.38
26	Неклиновский	4.52	4.76	0.23
27	Обливский	3.65	3.54	-0.11
28	Октябрьский	4.56	3.74	-0.82
29	Орловский	3.85	4.06	0.21
30	Песчанокопский	4.45	4.77	0.32
31	Пролетарский	4.09	4.57	0.48
32	Ремонтненский	3.39	3.03	-0.36
33	Родионово-Несветайский	4.64	3.89	-0.76
34	Сальский	4.24	4.03	-0.21
35	Семикаракорский	4.30	5.06	0.75
36	Советский	3.71	2.95	-0.76
37	Тарасовский	4.14	3.42	-0.72

N	Районы Ростовской области	Модель MIAMI	Данные Росстат	Разность Данные Росстата - MIAMI
38	Тацинский	3.98	3.64	-0.34
39	Усть-Донецкий	4.34	3.58	-0.76
40	Целинский	4.52	4.64	0.12
41	Цимлянский	3.73	3.58	-0.16
42	Чертковский	4.04	2.92	-1.11
43	Шолоховский	3.83	2.99	-0.84

Абсолютная скорость секвестрации почвенного углерода (т С/га/год) для пахотных почв
Московской области по административным районам

N	Район	Абсолютная скорость секвестрации				
		Методика ФАО		По статистическим данным		
		CHX	CHX	РИПР1	РИПР2	РИПР3
1	Балашихинский	0,104	0,334	0,382	0,430	0,525
2	Волоколамский	0,118	0,281	0,314	0,347	0,413
3	Воскресенский	0,04	0,153	0,179	0,206	0,259
4	Дмитровский	0,108	0,173	0,200	0,226	0,279
5	Домодедовский	0,048	0,188	0,218	0,248	0,308
6	Егорьевский	0,063	0,285	0,322	0,359	0,432
7	Зарайский	0,102	0,601	0,669	0,737	0,873
8	Истринский	0,126	0,313	0,349	0,384	0,456
9	Каширский	0,101	0,539	0,603	0,667	0,796
10	Клинский	0,112	0,293	0,326	0,359	0,426
11	Коломенский	0,049	0,173	0,200	0,226	0,279
12	Ленинский	0,07	0,090	0,112	0,133	0,176
13	Лотошинский	0,104	0,344	0,380	0,415	0,487
14	Луховицкий	0,06	0,274	0,320	0,367	0,461
15	Можайский	0,106	0,439	0,485	0,531	0,623
16	Наро-Фоминский	0,082	0,384	0,427	0,471	0,561
17	Ногинский	0,088	0,242	0,282	0,324	0,405
18	Озерский	0,091	0,174	0,207	0,240	0,307
19	Орехово-Зуево	0,054	0,224	0,263	0,302	0,382
20	Павлово-Посадский	0,047	0,173	0,202	0,231	0,289
21	Пушкинский	0,102	0,201	0,232	0,263	0,325
22	Раменский	0,042	0,152	0,179	0,205	0,258
23	Рузский	0,117	0,567	0,625	0,682	0,794
24	Сергиево-Посадский	0,082	0,300	0,337	0,375	0,449
25	Серебряно-Прудский	0,13	0,825	0,917	1,009	1,193
26	Серпуховский	0,054	0,230	0,265	0,300	0,369
27	Солнечногорский	0,127	0,372	0,413	0,455	0,540
28	Ступинский	0,045	0,304	0,345	0,386	0,468
29	Талдомский	0,119	0,412	0,466	0,518	0,620
30	Чеховский	0,05	0,162	0,190	0,218	0,273
31	Шатурский	0,074	0,254	0,295	0,336	0,418
32	Шаховской	0,116	0,430	0,473	0,517	0,605
33	Щелковский	0,121	0,498	0,557	0,616	0,734

Абсолютная скорость секвестрации почвенного углерода (т С/га/год) для пахотных почв
Московской области по почвенно-экологическим зонам

N	Зона	Абсолютная скорость секвестрации				
		по ФАО		По Росстату		
		CHX	CHX	РИПР1	РИПР2	РИПР3
E	Дерново-подзолистых почв южной тайги	0,075	0,257	0,291	0,325	0,395
L	Серых лесных почв лиственных лесов	0,100	0,535	0,600	0,665	0,796
M	Оподзоленных, выщелоченных и типичных черноземов и серых лесных почв лесостепи	0,134	1,024	1,161	1,298	1,571

Абсолютная скорость секвестрации почвенного углерода (т С/га/год) для пахотных почв
Ростовской области по административным районам

№ п/п	Название района	Mетодика ФАО	Использование данных			
		СХХ	СХХ	РИПР1	РИПР2	РИПР3
1	Азовский	-0.016	-0.015	0.021	0.059	0.135
2	Аксайский	-0.011	0.073	0.117	0.162	0.251
3	Багаевский	-0.009	-0.037	-0.009	0.016	0.074
4	Белокалитвинский	-0.001	0.110	0.151	0.193	0.275
5	Боковский	0.009	0.170	0.219	0.268	0.364
6	Верхнедонской	0.004	0.141	0.186	0.231	0.319
7	Веселовский	-0.010	-0.017	0.014	0.047	0.111
8	Волгодонской	-0.007	0.017	0.050	0.083	0.154
9	Дубовский	-0.008	0.041	0.068	0.096	0.151
10	Егорлыкский	-0.019	0.063	0.106	0.149	0.234
11	Заветинский	-0.010	0.150	0.186	0.221	0.291
12	Зерноградский	-0.015	0.000	0.034	0.068	0.136
13	Зимовниковский	-0.009	-0.024	-0.001	0.022	0.065
14	Кагальницкий	-0.013	0.001	0.035	0.069	0.138
15	Каменский	-0.001	0.088	0.131	0.173	0.258
16	Кашарский	0.006	0.065	0.103	0.143	0.222
17	Константиновский	-0.003	0.016	0.047	0.082	0.152
18	Красносулинский	-0.007	0.115	0.161	0.207	0.300
19	Куйбышевский	-0.009	-0.005	0.029	0.065	0.136
20	Мартыновский	-0.008	0.003	0.030	0.058	0.115
21	Матвеево-Курганский	-0.012	0.001	0.035	0.071	0.142
22	Миллеровский	-0.001	0.075	0.112	0.150	0.225
23	Милютинский	0.006	0.110	0.150	0.189	0.269
24	Морозовский	0.003	0.063	0.104	0.145	0.228
25	Мясниковский	-0.010	-0.025	0.004	0.033	0.094
26	Неклиновский	-0.015	-0.027	0.005	0.039	0.110
27	Обливский	0.005	0.015	0.044	0.071	0.127
28	Октябрьский	-0.009	0.086	0.129	0.171	0.256
29	Орловский	-0.010	-0.011	0.017	0.046	0.105
30	Песчанокопский	-0.012	-0.025	0.006	0.038	0.101
31	Пролетарский	-0.009	-0.030	-0.004	0.021	0.073
32	Ремонтненский	-0.010	0.041	0.068	0.095	0.150
33	Родионово-Несветайский	-0.009	0.073	0.114	0.155	0.238
34	Сальский	-0.011	0.018	0.054	0.090	0.165
35	Семикаракорский	-0.008	-0.042	-0.017	0.006	0.055
36	Советский	0.006	0.078	0.111	0.144	0.210
37	Тарасовский	-0.001	0.077	0.117	0.158	0.238

№ п/п	Название района	Методика ФАО	Использование данных Росстата			
			СХХ	СХХ	РИПР1	РИПР2
38	Тацинский	0.001	0.037	0.067	0.098	0.158
39	Усть-Донецкий	-0.006	0.072	0.109	0.145	0.217
40	Целинский	-0.015	-0.013	0.021	0.055	0.123
41	Цимлянский	-0.003	0.022	0.049	0.076	0.130
42	Чертковский	-0.003	0.123	0.167	0.210	0.297
43	Шолоховский	0.010	0.112	0.151	0.190	0.268

Абсолютная скорость секвестрации почвенного углерода (т С/га/год) для пахотных почв
Ростовской области по почвенно-экологическим зонам

N	Зона	Абсолютная скорость секвестрации					
		по ФАО		По Росстату			
		CHX	CHX	РИПР1	РИПР2	РИПР3	
H	Обыкновенных и южных черноземов степи	-0,006	0,044	0,075	0,108	0,176	
O	Темно-каштановых и каштановых почв сухой степи	-0,009	-0,010	0,014	0,042	0,096	
P	Зона светло-каштановых и бурых почв полупустыни	-0,011	0,110	0,139	0,168	0,228	