

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

имени М.В. ЛОМОНОСОВА

*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

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата биологических наук

Москва – 2025

Диссертация подготовлена на кафедре общего земледелия и агроэкологии  
факультета почвоведения МГУ имени М.В.Ломоносова

- Научный руководитель** – *Мешалкина Юлия Львовна, кандидат сельскохозяйственных наук, доцент*
- Официальные оппоненты** – *Романовская Анна Анатольевна, доктор биологических наук, чл.-корр. РАН, ФГБУ «Институт глобального климата и экологии имени академика Ю.А. Израэля», директор*  
*Семенов Вячеслав Михайлович, доктор биологических наук, доцент, ФГБУН «Пущинский научный центр биологических исследований Российской академии наук», Институт физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН, лаборатория почвенных циклов азота и углерода, главный научный сотрудник*  
*Рыжова Ирина Михайловна, доктор биологических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова», факультет почвоведения, кафедра общего почвоведения, профессор*

Защита диссертации состоится «09» декабря 2025 г. в 17 часов 00 минут на заседании диссертационного совета МГУ.015.2 Московского государственного университета имени М.В.Ломоносова по адресу: 119234, г. Москва, ул. Ленинские горы, д. 1, стр. 12, МГУ имени М.В.Ломоносова, биологический факультет, аудитория М-1.

Е-mail: nvkostina@mail.ru, тел.: 8 (495) 939 35 46

С диссертацией можно ознакомиться в отделе диссертаций научной библиотеки МГУ имени М.В. Ломоносова (Ломоносовский просп., д. 27) и на портале: <https://dissovet.msu.ru/dissertation/3643>

Автореферат разослан «01» ноября 2025 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,  
кандидат биологических наук



Н.В. Костина

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**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 продукционным 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; Schulten 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, 2022a) 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; Сафронова, 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, 2023a; Добровольская, Шабалина, 2023b; Smith et al., 2005; Lal et al., 2018; Paustian et al., 2019b; Romanenkov et al., 2019).

**Цель и задачи 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 этих 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, 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 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.

#### **Защищаемые положения:**

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.** Достоверность результатов основана на репрезентативности выборки, применении методов статистического анализа и моделирования, оценки точности моделей. Результаты были представлены на 16 научных конференциях: Международная научная конференция XXV Докучаевские молодежные чтения «Почва – жизнь» (Санкт-Петербург, 1-3 марта 2022); Всероссийская VI конференция молодых ученых Почвенного института им. В.В. Докучаева «Почвоведение: Горизонты будущего. 2022» (Москва, 24-28 октября 2022); 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) ;VI Международная научно-практическая конференция «Здоровые почвы – гарант устойчивого развития» (Курск, 30-31 марта 2023);XXX Международная научная конференция студентов, аспирантов и молодых учёных «Ломоносов-2023» (Москва, 10-21 апреля 2023); Всероссийская конференция «Углеродная нейтральность и экосистемные услуги органического вещества почв: методология и вызовы» (Санкт-Петербург, 24-25 апреля 2023); Международная научная конференция молодых учёных и специалистов, посвящённая 180-летию со дня рождения К.А. Тимирязева (Москва, 5-7 июня 2023); Всероссийская научная конференция «Агрохимическая наука – синтез академических знаний и практического опыта» (Москва, 12-13 сентября 2023); Всероссийская VII конференция молодых ученых «Почвоведение: Горизонты будущего» (Москва, 18-22 сентября 2023); Международная научная конференция II Никитинские чтения «Актуальные проблемы почвоведения, агрохимии и экологии в природных и антропогенных ландшафтах» (Пермь, 14-17 ноября 2023); II Международная научная конференция «Фундаментальные концепции физики почв: развитие, современные приложения и перспективы» (Москва, 25-31 мая 2024); International Symposium on Sustainable Utilization of Black Soils, (Чанчунь, Китай, 9-11 июля 2024); IX Всероссийский съезд общества почвоведов имени В.В. Докучаева (Казань, Russia, 12-16 августа 2024);VIII конференция молодых ученых «Почвоведение: Горизонты будущего» (Москва, 16-20 сентября 2024); Всероссийская научная конференция с международным участием «Почва как компонент биосферы: актуальные проблемы в условиях изменений климата» (Пушино, Russia, 25-28 ноября 2024); 3RD International Conference on Research of Agricultural and Food Technologies (I-CRAFT-2023), Adana, Turkiye, 4-6 октября 2023 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. Диссертантом был проведен анализ карт, построенных в рамках проекта GSOCseq, на уровне 10 субъектов РФ, а также по природным зонам и подзонам, охватывающим 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.

## Основное содержание работы

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

В главе дан обзор научной литературы. Он посвящён роли повышения почвенного плодородия в смягчении глобальных климатических изменений и их последствий через управление запасами почвенного углерода. Рассматриваются международные инициативы, такие как «4 промилле», и российские проекты (карбоновые полигоны, Сахалинский эксперимент). Анализируются методы оценки секвестрации углерода, влияние сельского хозяйства на эмиссию парниковых газов и практики устойчивого землепользования. Особое внимание уделено моделированию динамики органического вещества почв (на примере модели RothC) для прогнозирования изменений запаса углерода.

### ГЛАВА 2. ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

**Объекты исследования.** Исследование охватывает зональный ряд пахотных почв Европейской России: от дерново-подзолистых до каштановых, расположенных на территории десяти областей: Новгородская, Тверская, Московская, Калужская, Тульская, Брянская, Липецкая, Воронежская, Белгородская, Ростовская (рис.1).

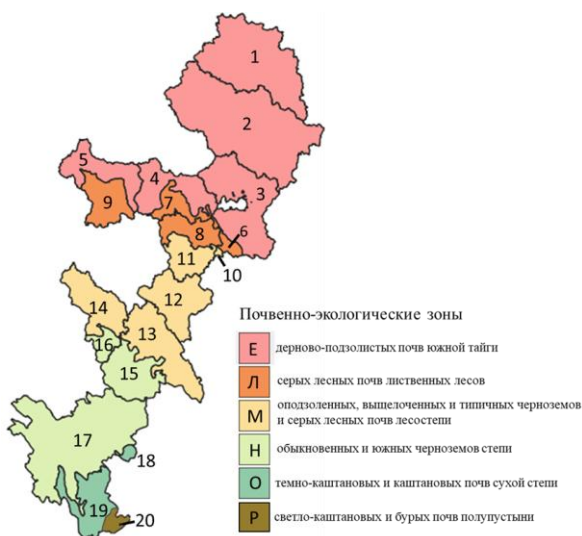


Рисунок 1 – Схема расположения исследуемых объектов и их соответствия почвенно-экологическим зонам

Выбор регионов для апробации разработанной методики расчета чистой первичной продукции (Московская и Ростовская области) обусловлен контрастными почвенно-климатическими условиями. Московская область характеризуется умеренно-континентальным климатом, преобладанием дерново-подзолистых и серых лесных почв, высокой долей лесов. Ростовская область расположена в степной зоне с черноземами и каштановыми почвами.

Дополнительно изучен участок карбонового полигона «Чашниково» (Московская область) с дерново-подзолистыми почвами, где проводился пробоотбор для анализа неопределенности запасов углерода.

**Методы исследования.** Методика объединяет моделирование динамики углерода на глобальных и локальных данных и оценку неопределенностей, что позволяет прогнозировать секвестрационный потенциал почв в условиях климатических изменений.

Алгоритм формирования карт GSOCseq. Создание карт базируется на методике ФАО с использованием модели RothC. Моделирование происходило по фазам: 1-ая фаза – *инициализация* (500-летний период для расчета соотношения основных пулов углерода при равновесном состоянии и оценке стабилизированных запасов углерода на 2000 г.); 2-ая фаза – *гармонизация* (учет реальных климатических данных 2001–2020 гг. для расчета запасов углерода к 2020 г.); 3-ая фаза – *прогноз* (оценка динамики углерода до 2040 г. Последняя фаза проводилась для четырех сценариев: при сценарии неизменного хозяйствования (CHX) и трех сценариях рационального использования почвенных ресурсов, которые подразумевают увеличение поступления органического вещества на 5% (РИПР1), на 10% (РИПР2) и на 20% (РИПР3) без анализа источников этого поступления. Для моделирования были использованы следующие входные данные: климатические показатели (CRU Ts4.0); почвенные характеристики (SoilGrids250m); маска пахотных земель; динамика растительного покрова (спутниковые данные MODIS); национальная карта запасов углерода (2000 г.).

Расчет чистой первичной продукции (NPP). NPP оценивали по модели MIAMI с шагом в один месяц на основе климатических данных (среднемесячная температура и сумма осадков за месяц). Для локального уровня разработана другая методика с использованием данных Базы данных муниципальных образований Росстата.

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)».

Создание больших выборочных баз данных по показателям «Посевные площади сельскохозяйственных культур» и «Урожайность сельскохозяйственных культур (в расчете на убранную площадь)» для Московской и Ростовской областей представляют собой трудоемкий этап агрегации и сведения информации по набору культур и заполнению недостающих данных. Затем урожайность пересчитывалась в биомассу растительных остатков согласно регрессионным уравнениям Левина (1977) для каждой из 20 культур.

Биомасса была пересчитана в количество углерода, поступающего на единицу площади пахотной почвы, на основании уравнения:

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

где  $C(t)$  – количество углерода в абсолютно сухих растительных остатках,  $m(\text{ц/га})$  – масса растительных остатков,  $S(\text{га})$  – посевная площадь,  $\text{Коэф}_{\text{вл}}$  – коэффициент пересчета на абсолютно-сухую массу, 0,45 – коэффициент пересчета растительных остатков на углерод, 0,1 – коэффициент пересчета в тонны.

Анализ неопределенности моделирования. Неопределенность пространственного моделирования оценивали по методике, предложенной ФАО, методом Монте-Карло с учетом погрешностей климатических данных ( $\pm 2\text{--}5\%$ ), содержания глины ( $\pm 10\%$ ), запасов углерода ( $\pm 20\%$ ). На карбоновом полигоне «Чашниково» проведен отбор почвенных проб для анализа общего варьирования в случае использования полевых данных. Для этого проведена оценка запасов почвенного углерода в прикопках послойно с учетом плотности сложения почвы.

### ГЛАВА 3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

#### Сравнительные скорости секвестрации углерода ряда областей Европейской территории России

В работе были рассчитаны абсолютные скорости секвестрации объектов исследования (т С/га в год) для четырех сценариев использования почвенных ресурсов (табл. 1).

Таблица 1. Абсолютная скорость секвестрации территориальных единиц для различных сценариев землепользования: СНХ – сценарий неизменного хозяйствования, РИПР1-3 – сценарии рационального использования почвенных ресурсов по возрастанию поступления углерода в почву (на 5, 10 и 20% больше, чем в СНХ)

		Абсолютная скорость секвестрации, т С/га в год			
		СНХ	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
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 (восток)	-0,011	0,022	0,042	0,084

Наибольшая скорость секвестрации для сценария СНХ присуща на территориях с преобладанием серых лесных почв лиственных лесов, а также оподзоленных, выщелоченных и типичных черноземов и серых лесных почв лесостепи. При сценариях РИПР высокие темпы секвестрации углерода начинают

распространяться на север и юг и захватывают все больше территорий 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.

Результаты расчетов целевых показателей говорят о том, что глобальная цель инициативы «4 на 1000» не может быть достигнута ни в одной из рассмотренных областей Европейской территории России вне зависимости от сценария применения углерод сберегающих практик (рис. 2).

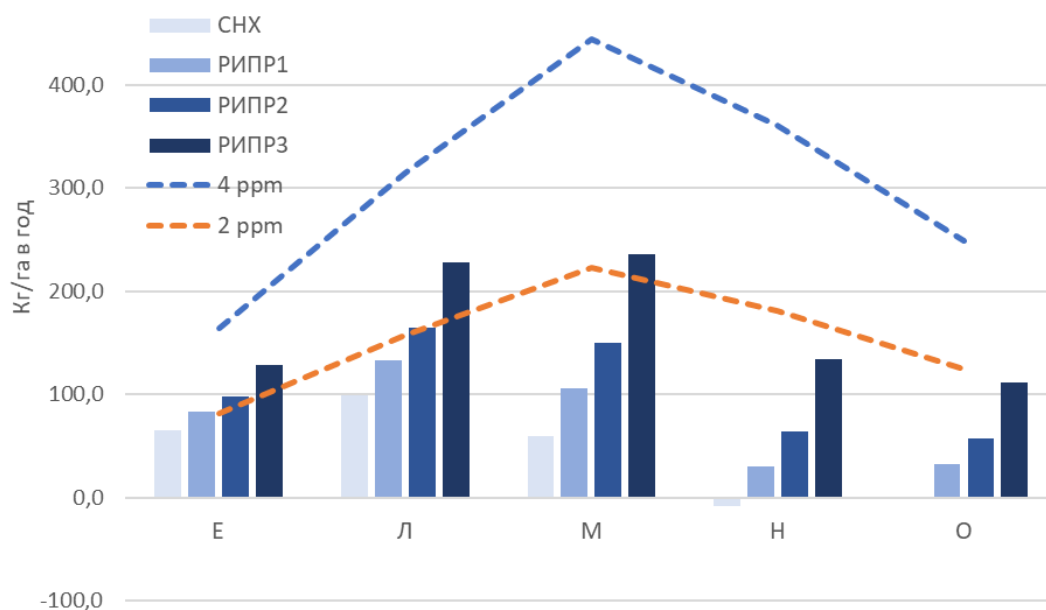


Рисунок 2 – Прогноз абсолютных скоростей секвестрации и целевые уровни инициатив «4 на 1000» и «2 на 1000». Е – зона дерново-подзолистых почв южной тайги; Л – зона серых лесных почв лиственных лесов; М – зона оподзоленных, выщелоченных и типичных черноземов и серых лесных почв лесостепи; Н – зона обыкновенных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

Цель «2 промилле» может быть реализована 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.

### Неопределенность расчетов

Медиана расширенной неопределенности оценок скорости секвестрации углерода десяти областей Европейской территории России для сценария

неизменного хозяйствования составляет 14,7%, значения варьировали от 11,9% до 20,1%. Для всех сценариев РИПР медиана составила 15,5%, значения изменялись от 12,1% до 22,6%.

Медиана расширенной неопределенности оценок скорости секвестрации углерода для Московской области составляет 14,1% для сценария неизменного хозяйствования и 15,4% для технологий рационального использования почвенных ресурсов. Если в исследованиях вместо готовой Всемирной карты запасов органического углерода в 30-сантиметровом слое почвы (GSOCmap) перейти на натурные полевые данные о запасах углерода, когда образцы отбираются из прикопок, то вклад этой компоненты будет составлять 12,0% (расширенная неопределенность). Тогда общая расширенная неопределенность исследований вырастет до 18,5% для сценария СНХ и 19,5% – для сценариев РИПР.

Для Ростовской области неопределенность картографических расчетов составила 14,9% для СНХ и 16,0% для сценариев РИПР.

### Оценка NPP на основе статистических данных

Для расчетов по 33 муниципальным образованиям Московской области 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...». Анализ исходной информации по группам культур показал, что структура посевных площадей в основном приходится на сочетание зерновых, картофеля и трав (рис. 3).

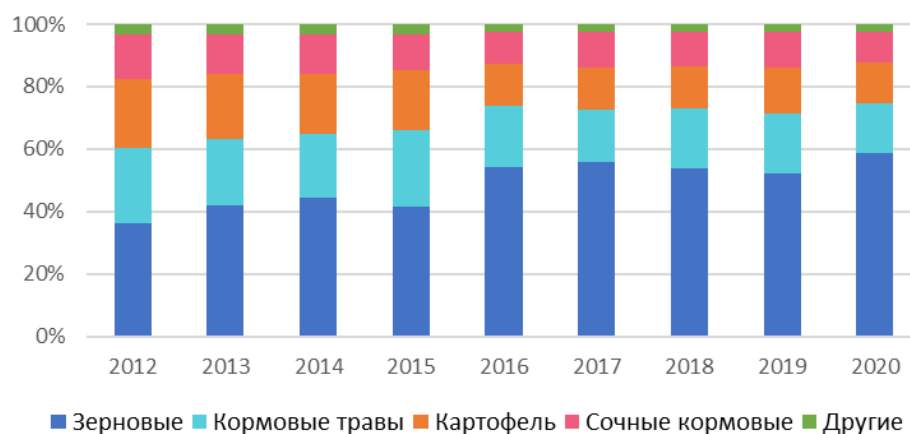


Рисунок 3 – Структура посевных площадей Московской области по группам сельскохозяйственных культур

Результаты моделирования по Московской области с использованием глобальных климатических данных показывают высокую продуктивность на юге региона (рис. 4). Медианное значение для всей области составляет 4,90 т С/га в год, разброс значений варьируется от 4,63 до 5,06 т С/га в год. По статистическим данным получена несколько иная карта распределения уровней NPP области. Медианное значение для всей области составляет 5,40 т С/га в год. При этом сильно

увеличился разброс значений; они варьируются от 3,48 т С/га в год до 8,70 т С/га в год.

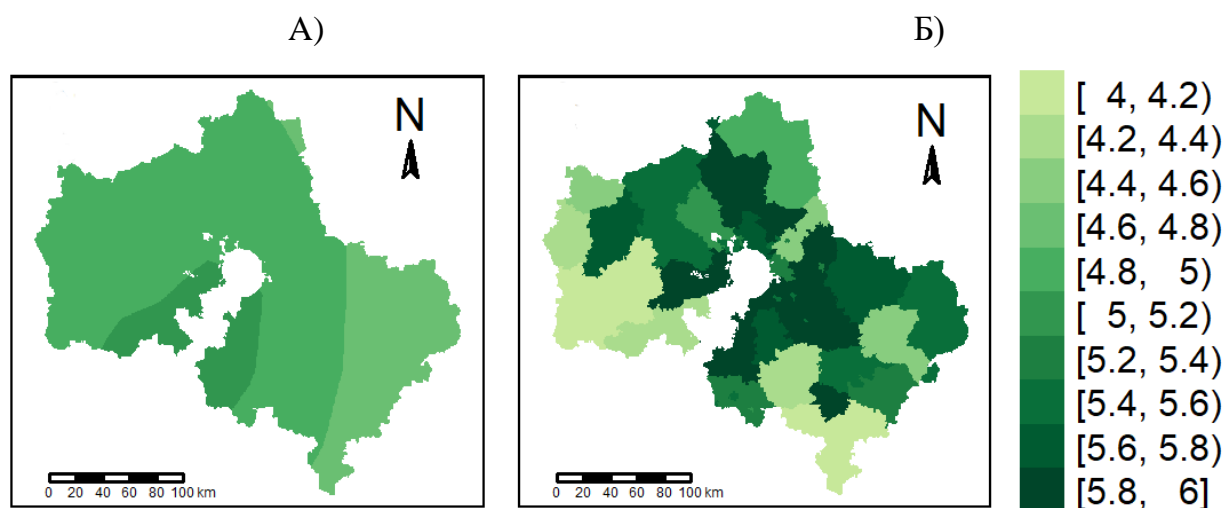


Рисунок 4 – Чистая первичная продукция Московской области (NPP, т С/га в год) по статистическим данным согласно административному делению (А) по методике ФАО и (Б) с использованием данных Росстата

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). Районы на юго-западе области не реализовывают свой природно-климатический потенциал, так как по методике ФАО их продуктивность выше, чем по данным Росстата.

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.

База данных по 43 муниципальным образованиям Ростовской области 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. 5).

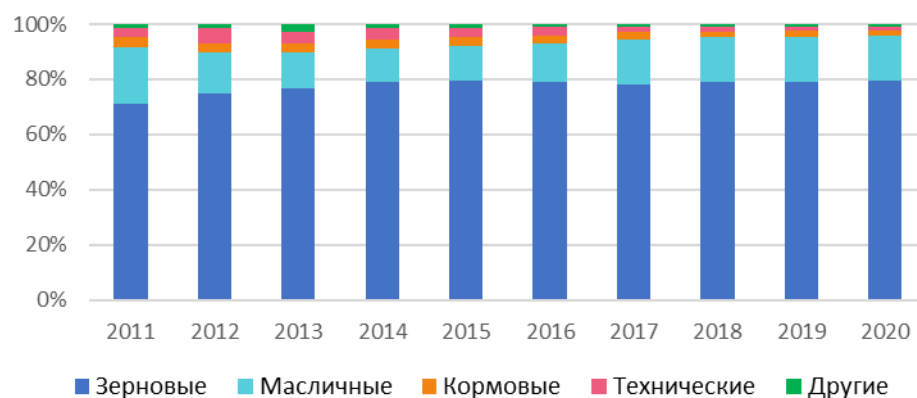


Рисунок 5 – Структура посевных площадей Ростовской области по группам сельскохозяйственных культур

В Ростовской области значения продуктивности изменяются плавно с запада на восток без учета особенностей каждого района (рис. 6). Медианное значение для всей области составляет 4,03 т С/га в год. При обращении к локальным данным климатический потенциал области перераспределяется в зависимости от особенностей каждого района. Медианное значение чистой первичной продукции составило 3,58 т С/га в год, что свидетельствует о снижении оценки продуктивности по сравнению ожиданиями на основе климатических данных. Также зафиксировано увеличение разброса значений.

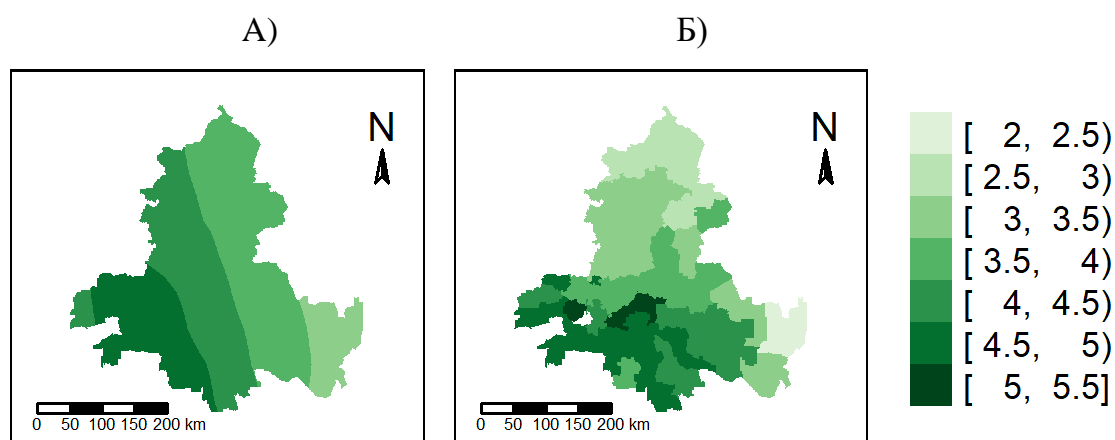


Рисунок 6 – Чистая первичная продукция Ростовской области (NPP, т С/га в год) по статистическим данным согласно административному делению (А) по методике ФАО и (Б) с использованием данных Росстата

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). Высокие уровни NPP характерны для зоны обыкновенных и южных чернозёмов степи, что осталось справедливым и при использовании альтернативной методики расчета продуктивности.



Результаты моделирования по методике ФАО говорят о том, что при продвижении с северо-запада на юго-восток Русской равнины чистая первичная продукция плановмерно снижается (табл. 2). Моделирование на национальных статистических данных также сохраняет подобную тенденцию, однако для черноземной зоны и примыкающих к ней темно-каштановых почв получили близкие значения.

Таблица 2 Чистая первичная продукция пахотных почв Московской и Ростовской областей (NPP, т С/га в год)

Зона почвенно-экологического районирования	Методика ФАО	По локальным данным
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
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

### **Оценка скорости секвестрации углерода на основе данных Росстата**

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 СНХ (рис. 7).

Прогнозные медианные значения, полученные по традиционной методике ФАО, достигли 0,09 т С/га в год для сценария СНХ. Использование при моделировании NPP данных Росстата позволило получить другие оценки скорости секвестрации почвенного углерода пахотными почвами. Для сценария СНХ значение выросло до 0,31 т С/га в год. При этом существенно вырос разброс значений.

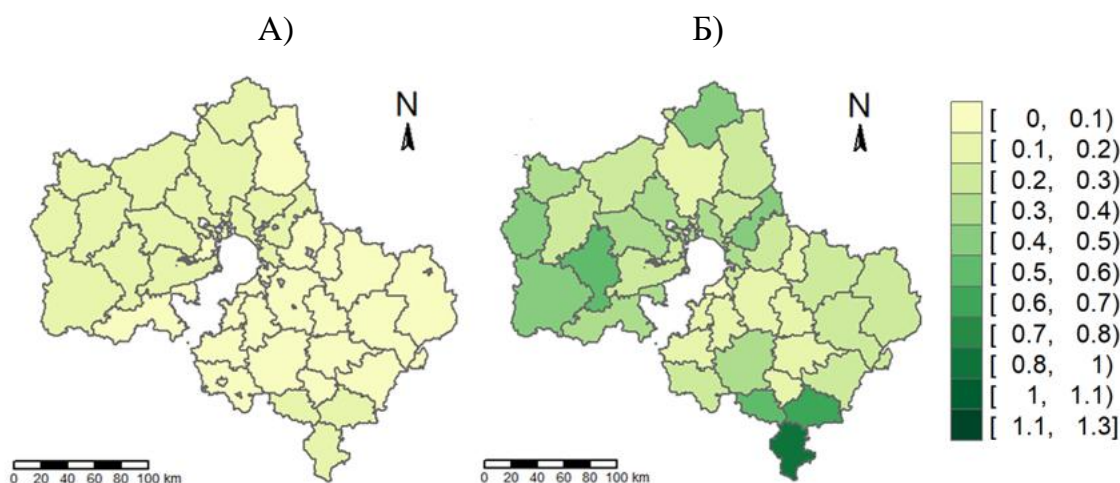


Рисунок 7 – Скорость секвестрации углерода пахотными почвами административных единиц Московской области (т С/га в год) по сценарию СНХ, рассчитанная (А) по методике ФАО и (Б) с использованием статистических данных Росстата

Расчеты прогнозируют накопление почвенного органического углерода на всей территории для любого из обсуждаемых сценариев (рис. 8). Средние значения скорости секвестрации для сценариев СНХ, РИПР1, РИПР 2, РИПР3 равны 0,31, 0,35, 0,39, 0,46 т С/га в год, соответственно.

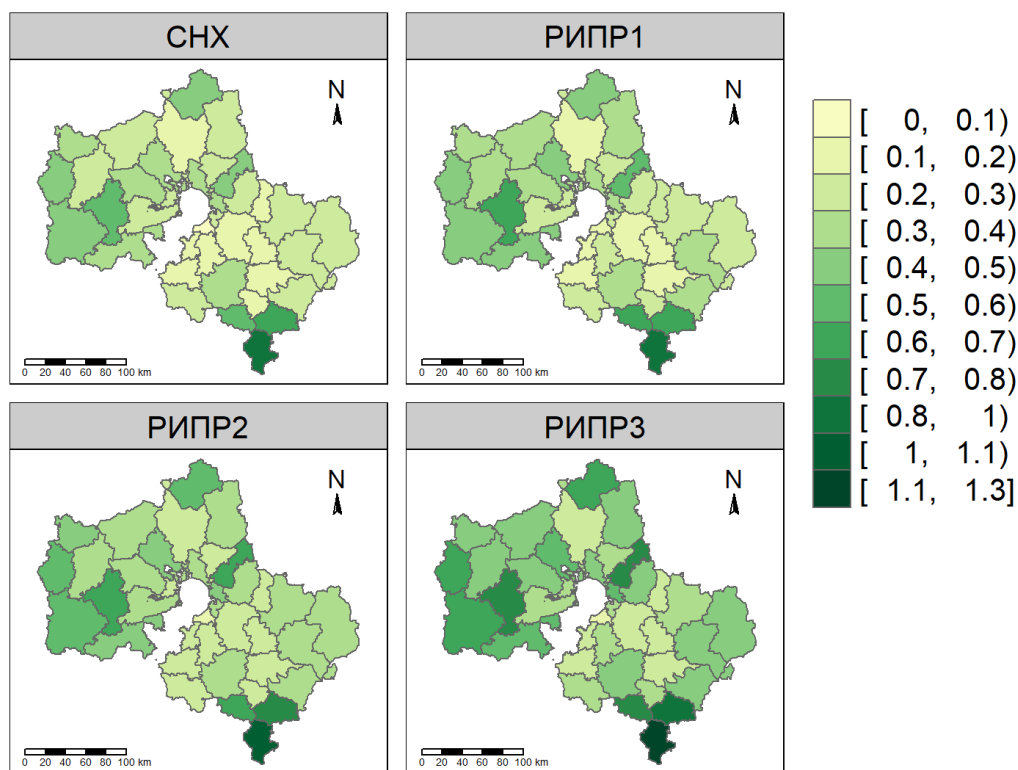


Рисунок 8 – Скорость секвестрации углерода пахотными почвами административных единиц Московской области (т С/га в год) по статистическим данным Росстата

Прогнозирование на уровне почвенно-экологических зон 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 данных Росстата. 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 данных Росстата, соответственно. Для зоны серых лесных почв лиственных лесов эти показатели равны 0,10 и 0,53 т С/га в год.

Расчеты скорости абсолютной секвестрации углерода в Ростовской области по традиционной методике, предложенной ФАО, показали близкие к нулевым значения (рис. 9). Медиана составила -0,007 т С/га в год при сохранении практик хозяйствования (сценарий СНХ). Для сценария СНХ произошел сдвиг в сторону положительных значений, медиана составила 0,032 т С/га в год. Наблюдается рост разброса значений от минимума в точке -0,093 т С/га в год до максимум в точке 0,260 т С/га в год.

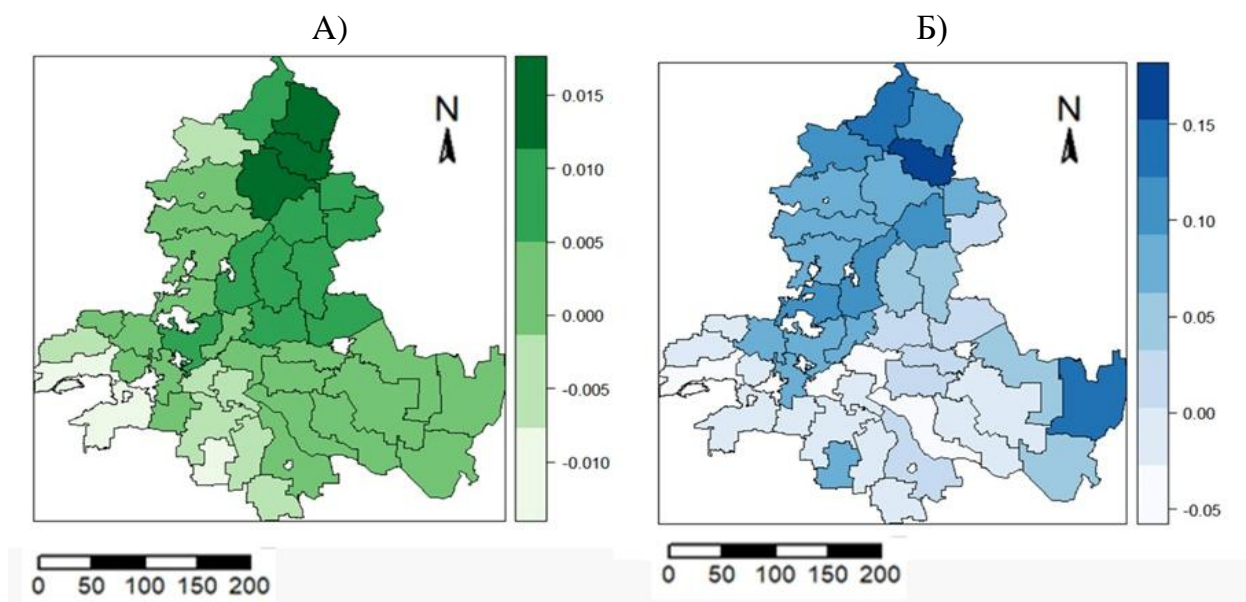


Рисунок 9 – Скорость секвестрации углерода пахотными почвами административных единиц Ростовской области (т С/га в год) по сценарию СНХ, рассчитанная (А) по методике ФАО и (Б) с использованием статистических данных Росстата

Тенденция к накоплению углерода ожидается для всех сценариев при моделировании с использованием национальных баз данных (рис. 10). 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.

В целом для области средняя скорость секвестрации изменяется статистически незначимо при переходе на другой источник данных, однако неравномерность внутри области становится заметнее. Так, при прогнозировании на уровне почвенно-экологических зон оказалось, что для зоны обыкновенных и

южных черноземов степи, а также для зоны светло-каштановых и бурых почв полупустыни появляется ощутимая тенденция к закреплению углерода.

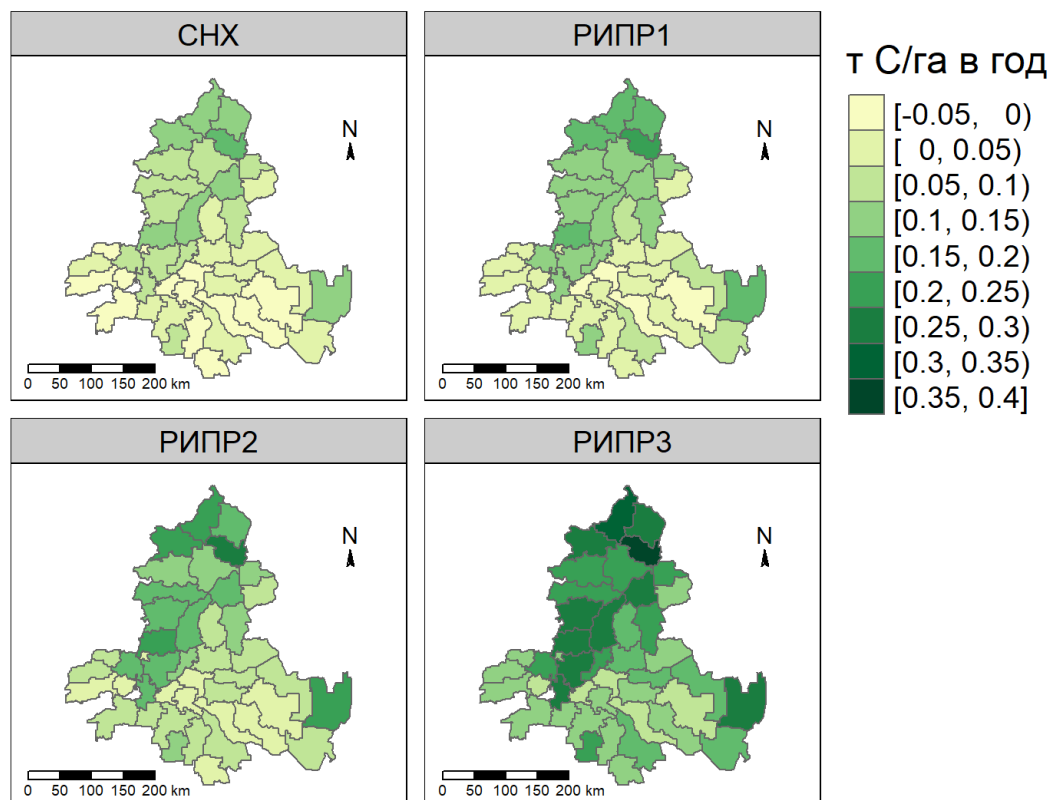


Рисунок 10 – Скорость секвестрации углерода пахотными почвами административных единиц Ростовской области (т С/га в год) по статистическим данным Росстата

Таким образом, 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.

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.

Медианное значение запасов углерода в пахотных почвах Московской области, рассчитанное на 2020 г., составило 55,1 т С/га. Суммарные запасы углерода – 73,3 Кт С. Целевые показатели в 4 и 2 промилле от запасов проиллюстрированы на рисунке 11. Медианное значение для всей области составило 0,22 т С/га в год для достижения 4 промилле и 0,11 т С/га в год, соответственно, для достижения 2 промилле.

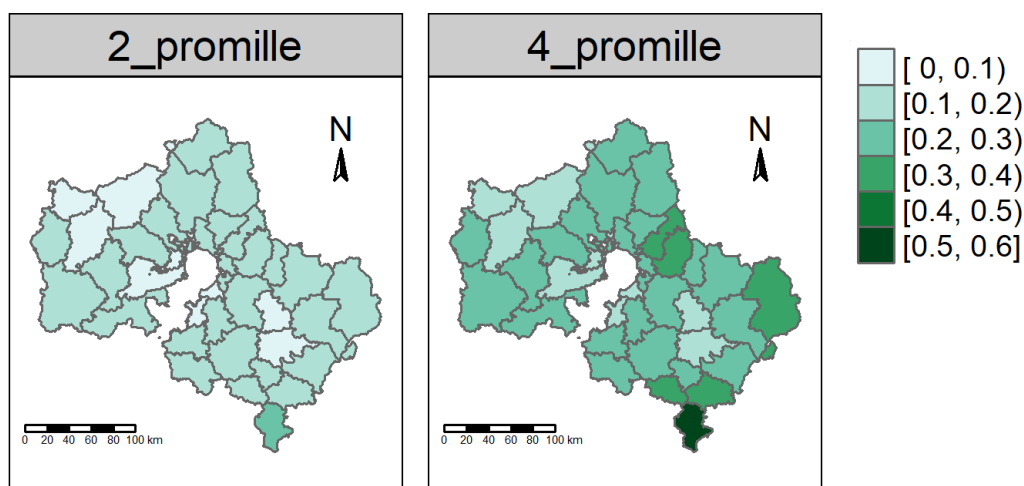


Рисунок 11 – Целевые показатели скорости секвестрации углерода пахотными почвами Московской области в 4 и 2 промилле (т С/га в год) по статистическим данным Росстата

Для Ростовской области медианное значение запасов углерода в пахотных почвах на 2020 г. составило 78,1 т С/га. Суммарные запасы углерода – 428,6 Кт С. Целевые показатели в 4 и 2 промилле от запасов проиллюстрированы на рисунке 12. Медианное значение для всей области составило 0,31 т С/га в год для достижения 4 промилле и 0,16 т С/га в год – для достижения 2 промилле.

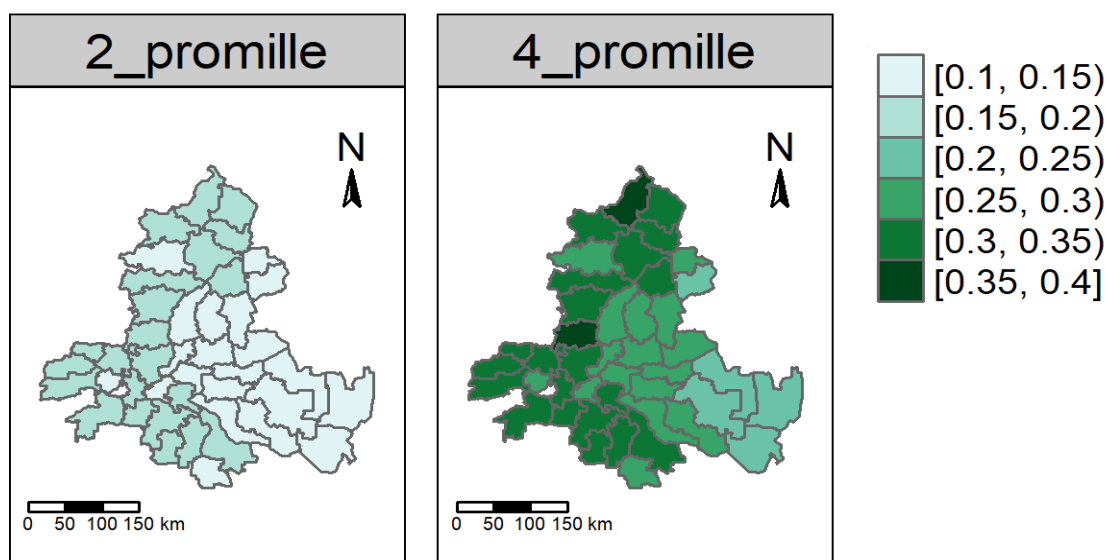


Рисунок 12 – Целевые показатели скорости секвестрации углерода пахотными почвами Ростовской области в 4 и 2 промилле (т С/га в год) по статистическим данным Росстата

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).

По результатам анализа научной литературы об эффективных методах углеродсберегающих технологий, а также в результате оценки потенциала секвестрации углерода пахотными почвами Московской и Ростовской областей были проанализированы рекомендации по разработке конкретного перечня мер, подразумеваемых под сценариями РИПР. Так как смена землепользования пахотных земель не рассматривалась в данной работе, а источник органических удобрений, как правило, располагается вне рассматриваемого ландшафта, то представляется целесообразным в первую очередь применение таких мер, как травосеяние, применение сидератов, а также пересмотр севооборота и набора составляющих его культур.

Обилие пропашных культур в Московской области создают условия для минерализации и потерь углерода. Размещение многолетних трав (люцерна, клевер) способствует существенному накоплению подземной биомассы, 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, в последние десятилетия структура посевных площадей сосредоточена на экономически выгодные культуры: озимая пшеница, подсолнечник и ячмень яровой. Добавление С-4 растений в севооборот позволяет накапливать значительную биомассу благодаря их способности эффективно использовать  $\text{CO}_2$  в условиях высоких температур (кукуруза, сорго). 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  $\text{КАСа}$ ).

## 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 (РИПЗ) 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 CO<sub>2</sub>. 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.

**Статьи, опубликованные в изданиях, рекомендованных для защиты  
в диссертационном совете МГУ имени М.В.Ломоносова  
по специальности и отрасли наук:**

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 0,339 (РИНЦ)). Вклад автора в печатных листах: (0,40/0,50 п.л.). Здесь и далее в скобках приведён объем публикаций в печатных листах и вклад автора в печатных листах.
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. EDN: ZPYRTE (Импакт-фактор 1,444 (РИНЦ)). (0,70/1,55 п.л.)
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. – EDN: YIXGMW (Импакт-фактор 2,209 (РИНЦ)) (0,22/1,10 п.л.) [Samsonova V.P., Meshalkina J.L., **Dobrovolskaya V.A.**, Kondrashkina M.I., Dyadkina S.E., Filippova O.I., Krotov D.G., Morozova T.M., Krasilnikov P.V. Investigation of uncertainty in organic carbon stock estimates on a field scale // Eurasian Soil Science. – 2023. – Vol. 56, № 11. – P. 1765-1775. – EDN: DVLUIC. (Импакт-фактор 1.6, Q2 (JIF); 0.428, Q2 (SJR))]

***Публикации в других научных изданиях:***

4. **Dobrovolskaya V.A.**, Meshalkina J.L., Gorbacheva A.Y., Romanenkov V.A. Map of potential sequestration of carbon by arable soils in Rostov oblast updated using Rosstat Data // Moscow University Soil Science Bulletin. – 2024. – Vol. 79, № 5. – P. 639–646. – EDN: ZRUAMF. (Импакт-фактор 0,323 (РИНЦ)) (0,57/0,72 п.л.)
5. 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 oblast // Moscow University Soil Science Bulletin. – 2024. – Vol. 79, № 5. – P. 656–663. – EDN: CALLAS. (Импакт-фактор 0,323 (РИНЦ)) (0,27/0,68 п.л.)
6. **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. – 2023. – № 5(59). – С. 1–4. – EDN: ZDWWIF. (Импакт-фактор 0,275 (РИНЦ)) (0,08/0,14 п.л.) [**Dobrovolskaya V.**, Shabalina D., Meshalkina Yu. Key differences between CRU and Terra Climate meteorological data when modeling soil carbon sequestration (using the example of the Rostov Region) // AgroEcoInfo. – 2023. – Vol. 5, № 59. – P. 29. – DOI 10.51419/202135529].