

КАРТЫ ПОТЕНЦИАЛА СЕКВЕСТРАЦИИ ПОЧВЕННОГО УГЛЕРОДА В ПАХОТНЫХ ПОЧВАХ РОССИИ

© 2024 г. В. А. Романенков^{a, b}, Ю. Л. Мешалкина^{a, *}, А. Ю. Горбачева^a, А. Н. Кренке^c,
И. К. Петров^d, О. М. Голозубов^a, Д. И. Рухович^e

^aМГУ им. М. В. Ломоносова, Ленинские горы, 1, Москва, 119991 Россия

^bВНИИ агрохимии им. Д. Н. Прянишникова, ул. Прянишникова, 31а, Москва, 127434 Россия

^cИнститут географии РАН, Старомонетный пер., 29, стр. 4, Москва, 119017 Россия

^dООО «Аналитический центр лесного и сельского хозяйства», Холодильный пер., 3, Москва, 115191, Россия

^eПочвенный институт им. В. В. Докучаева, Пыжевский пер., 7, стр. 2, Москва, 119017 Россия

*e-mail: jlmesh@list.ru

Поступила в редакцию 24.07.2023 г.

После доработки 27.12.2023 г.

Принята к публикации 29.12.2023 г.

Одним из способов противодействия глобальному изменению климата может быть внедрение систем земледелия, при которых сельскохозяйственные почвы смогут в значительной степени накапливать углерод. Целью работы было создание серии карт, в которых оценивался потенциал секвестрации органического углерода пахотными почвами России в верхнем 30-сантиметровом слое. В качестве исходных использованы данные из глобальных и национальных баз данных. Карты были созданы в рамках проекта ФАО по составлению Глобальной карты секвестрации почвенного углерода (GSOCseq). Карты составлены по унифицированной методологии, использующей модель RothC для прогноза скорости секвестрации углерода в период 2020–2040 гг. при сценарии неизменного хозяйствования, а также для трех сценариев устойчивого управления почвенными ресурсами при различном приросте поступления органического вещества (+5, +10 и +20%) вследствие применения углеродосберегающих практик. При сохранении существующей практики землепользования в течение 20 лет суммарно потенциальную скорость секвестрации пахотными почвами РФ в слое 0–30 см можно оценить как 8.5 Мт/год, при применении углеродосберегающих практик – до 25.5 Мт/год. Показано, что значения скорости секвестрации углерода пахотными почвами для каждой зоны почвенно-экологического районирования (за исключением зоны светло-каштановых и бурых почв полупустыни, где она практически не отличается от нуля) и в национальном масштабе положительны. Наибольший потенциал секвестрации имеют следующие регионы: Алтайский край, Омская область, Новосибирская область, Красноярский край. В ряде субъектов Российской Федерации: Краснодарский край, Республика Крым, Ростовская область, Приморский край, Республика Адыгея и Калининградская область должны быть приняты меры по внедрению практики устойчивого управления почвенными ресурсами.

Ключевые слова: ресурсосберегающие технологии в сельском хозяйстве, изменение климата, модель RothC, сельскохозяйственные земли, баланс углерода, инициатива “4 per 1000”

DOI: 10.31857/S0032180X24050037, **EDN:** YLUZDQ

ВВЕДЕНИЕ

Для прогноза последствий глобального изменения климата большой интерес представляет получение точной оценки мирового запаса почвенного органического углерода, а также потенциала его накопления почвой. Поглощение CO₂ из атмосферы

и последующее увеличение запасов органического углерода на антропогенно-нарушенных участках почвенного и растительного покровов рассматривается в качестве важнейшей стратегии смягчения антропогенного влияния на изменение климата и улучшения других экосистемных функций почвы [28]. Основное преимущество расширения

масштабов накопления углерода сельскохозяйственными землями заключается в том, что при этом будет происходить поддержание и повышение плодородия земель, а также этот подход не требует изменения землепользования, например, превращения сельхозугодий в леса и, таким образом, не увеличивает конкуренцию за земельные ресурсы [16]. Предполагается, что создание положительного баланса углерода в системе почва—растительность будет достигнуто в результате повсеместного внедрения практик почвозащитного ресурсосберегающего земледелия [22, 23]. Согласно множеству научных исследований, проведенных в разных странах мира, в течение следующих нескольких десятилетий сельскохозяйственные почвы смогут в значительной степени способствовать поглощению атмосферного углерода [15].

Общий запас органического углерода в метровом слое почв составляет 1462–1548 Гт, в двухметровом — 2376–2456 Гт [8]. Оценки потерь почвенного органического углерода за историю землепользования колеблются в широком диапазоне от 44 до 537 Гт [13]. Согласно последним данным, за 12 тыс. лет его потери составили 133 Гт в 2 метровом слое [21]. При внедрении практик землепользования, направленных на связывание углерода в почве (таких, как прямой посев для минимизации воздействия на почвы, постоянное мульчирование почвы растительными остатками и покровными культурами, широкое применение различных биологических методов) две трети потерь могут быть компенсированы. Обобщение данных мировых исследований показывает, что скорости поглощения органического углерода почвой могут достигать от 0.2 до 0.5 т С/га в год [15]. Теоретически максимальное количество углерода, которое может быть поглощено почвой из атмосферы, оценено в 77 Гт С (<https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/#FullReport>). Локальные потери и скорость секвестрации органического углерода почв зависят от типа почв, растительности, климата, а также от вида и продолжительности землепользования.

Почвенный покров РФ обладает большим многообразием и протяженностью, его можно рассматривать как самый большой в мире “резервуар почвенного углерода” [4]. Запасы углерода в метровом слое почв России оцениваются как 292 Гт С [26], что составляет больше 15% от мирового запаса углерода.

Пахотные и пастбищные почвы занимают около 12% территории страны, запасы органического углерода в них оцениваются как 16.8 Гт С в верхних 0.3 м и 28.0 Гт С в верхнем метре. Если ориентироваться на целевой показатель в 4 промилле, то пахотные почвы России смогут накапливать до 4.4 млн т С, что соответствует скорости поглощения 0.16 т С/га в год [15]. Однако не все ученые согласны с этим мнением, так в публикации [2] приводятся оценочные расчеты, показывающие,

что цель инициативы “4 промилле” не может быть достигнута в России полностью из-за того, что существует ограничение в возможности насыщения пахотных почв углеродом. В статье предлагается трансформировать эту инициативу в национальную цель “2 промилле” с периодом реализации 12–15 лет. Однако вопрос о том, каков реальный потенциал для секвестрации углерода у почв России пока еще недостаточно изучен.

В 2006–2007 гг. были проведены работы по оценке содержания углерода в почвах европейской части России и Украины [18, 19, 20, 24, 25]. Работы основаны на применении модели RothC, которая более подробно описана ниже. В рамках этих исследований были разработаны возможные сценарии по изменению запасов углерода при различных видах эксплуатации пахотных земель [18] и глобального изменения климата [19]. Моделирование охватывало период 1990–2070 гг. [25]. Для модели RothC была разработана база данных, содержащая необходимые параметры по землепользованию, климату и характеристикам почв [20]. Особенностью работ 2006–2007 гг. являлось то, что база данных формировалась не по регулярным сетям, а по нескольким сотням полигонов, на которые была разделена европейская часть России. Эти полигоны были выделены по принципу однородности СПП с учетом административных границ субъектов [5]. Более подробной информации на тот момент собрать не удалось.

В 2020–2021 гг. был реализован Проект Глобального почвенного партнерства Продовольственной и сельскохозяйственной организации Объединенных Наций (ФАО) по составлению Глобальной карты секвестрации углерода в верхнем слое 0–30 см сельскохозяйственных земель (Global Soil Organic Carbon Sequestration Potential Map — GSOCseq) (<https://www.fao.org/soils-portal/data-hub/soil-maps-and-databases/global-soil-organic-carbon-sequestration-potential-map-gsocseq/en/>), методика создания которой изложена в Техническом руководстве (<https://www.fao.org/3/cb0353en/cb0353en.pdf>) [27]. Согласно проекту для каждой из стран мира были созданы 29 карт, составленных по унифицированной методологии, разработанной на базе модели RothC (Rothamsted Long Term Field Experiments Carbon Model, Углеродная модель Ротамстедского длительного полевого опыта) [9]. Модель RothC описывает круговорот органического углерода в верхнем слое автоморфных минеральных почв. Она позволяет учитывать влияние типа почвы, температуры, влажности и растительного покрова на процесс круговорота углерода с шагом в один месяц [9]. Модель RothC строится на количественном описании почвенных процессов. Почвенный органический углерод в модели разделен на четыре активных пула: разлагаемый растительный материал, устойчивый растительный

материал, микробная биомасса и гумифицированное органическое вещество, которые различаются по скорости трансформации и один неактивный пул, который содержит инертное органическое вещество. Прогноз секвестрации почвенного органического углерода сельскохозяйственными землями производился в проекте на 20 лет согласно 4 сценариям: неизменного хозяйствования (*business as usual* — далее BAU), а также для трех сценариев при приросте поступления органического вещества в результате внедрения практик почвозащитного ресурсосберегающего земледелия (сокращение названий практик происходит от слов “sustainable soil management” — SSM), при которых происходит увеличение поступления органического углерода в почву (<https://www.fao.org/3/cb0353en/cb0353en.pdf>) [27]. Предполагается, что 20-летний период является достаточным сроком, в течение которого запасы почвенного углерода приближаются к новому устойчивому состоянию.

Цель настоящей работы — создание серии карт для территории Российской Федерации, в которых оценивается потенциал секвестрации органического углерода верхним 30-сантиметровым слоем пахотных почв согласно методике Проекта ФАО по составлению Глобальной карты секвестрации почвенного углерода и изложенной в Техническом руководстве [27]. Были рассмотрены пахотные почвы, так как они в большей степени подвержены сокращению запасов органического углерода. В работе были использованы доступные данные из глобальных и национальных баз данных.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Основные принципы моделирования. Карты потенциала секвестрации почвенного органического углерода (далее почвенного углерода) были созданы согласно Техническому руководству Глобального почвенного партнерства ФАО для построения карт в глобальном масштабе [27].

Моделирование производилось в три этапа:

(1) Первый этап — “инициализация” (*Spin up*), задача которого состояла в том, чтобы привести в модели RothC запасы углерода и его пулы к равновесному состоянию, основываясь на климатических, почвенных, растительных и сельскохозяйственных характеристиках. Равновесные запасы должны соответствовать величине, приведенной во Всемирной карте запасов органического углерода в слое 0–30 см почвы (GSOC17) [7, 10]. Годовой цикл моделирования повторялся 500 раз [27], пока не была достигнута постоянная величина запасов органического углерода, соответствующая величине, приведенной во Всемирной карте запасов органического углерода в слое 0–30 см почвы (GSOC17) [7, 10]. Моделирование выполнялось при неизменных погодных условиях, в качестве таковых приняты среднесезонные

величины за период 1980–2000 гг. Общее годовое поступление углерода с растительными остатками изначально принималось равным 1 т С га/год. В результате моделирования было получено “исходное” среднее годовое поступление углерода по сценарию BAU вплоть до 2000 г. [27].

(2) Второй этап — *подготовка или временная гармонизация (Warm up)*. Он заключается в гармонизации данных, так как запасы углерода на карте ФАО были составлены из разновременных данных за период с 1960 по 2000 гг. Запасы почвенного углерода на Всемирной карте (GSOC17) в руководстве [10] условно считаются запасами углерода, которые были за двадцать лет до современного периода, совпадающего с начальной точкой моделирования, т.е. 2000 г. Этап подготовки проводится с учетом реальных погодных условий 2000–2020 гг. и с изменением ежегодного поступления углерода с растительными остатками.

(3) Третий этап — *прогноз (Forward)*, задача которого состоит в оценке изменения запасов почвенного углерода, а также его скорости в следующие 20 лет, в 2020–2040 гг. в зависимости от предложенных в методике сценариев. Первый сценарий неизменного хозяйствования BAU предполагает, что в этом случае ежегодно поддерживается стабильное поступление углерода в почву с растительными остатками, соответствующее современному уровню. Согласно трем сценариям SSM при применении методов устойчивого управления почвенными ресурсами должен произойти определенный прирост поступления в почву органического углерода от современного уровня в зависимости от сценария: сценарий SSM1 — на 5%, сценарий SSM2 — на 10%, сценарий SSM3 — на 20%. Эти сценарии можно рассматривать как гипотетические, так как конкретные ресурсосберегающие практики и способы их достижения не обсуждаются.

Прогнозное моделирование основывалось на климатических параметрах 2000–2020 гг., а также использовало карты землепользования за 2020 г. Абсолютная секвестрация почвенного углерода оценивалась как разница между запасами, полученными в результате моделирования в 2040 г. для различных сценариев, и расчетными базовыми запасами на 2020 г. Относительное накопление почвенного углерода оценивалось как разница между соответствующими запасами почвенного углерода из прогноза на 2040 г. для сценариев SSM и моделируемыми запасами почвенного углерода на 2040 г. для сценария BAU.

Исходные данные. Карты были созданы с пространственным разрешением в 1 км, расчеты проводились для слоя 0–30 см. Для создания серии карт была выбрана одна группа землепользования — пахотные земли. Далее будет описан алгоритм получения и источники исходных данных, использованных при моделировании.

Алгоритм получения маски пахотных земель России. Для всей территории РФ отсутствует маска полей, которая включала бы поля, находящиеся в интенсивной обработке, и исключала бы заброшенные сельскохозяйственные угодья. Актуальная на 2020 г. карта пахотных земель России получена путем синтеза двух масок для районов активного земледелия на территории России, составленных на основе различных принципов:

(1) *Маска данных с разрешением в 30 м, полученная для проекта глобальной продовольственной безопасности (Global Food Security-Support Analysis Data at 30 m, GFSAD30, <https://www.usgs.gov/centers/western-geographic-science-center/science/global-food-security-support-analysis-data-30-m>).* Проект GFSAD30 предоставляет данные о пахотных землях и водопользовании с разрешением 30 м для всего земного шара. Контур пахотных полей были получены на основе временных рядов с шагом 2–4 мес. снимков Landsat-8 за 3–4 года. Спектральные образы строились отдельно для каждой из 74 агроэкологических зон на основе отражения во всех спектральных каналах Landsat-8, а также — два наиболее распространенных вегетационных индексов: NDVI (Normalized Difference Vegetation Index, нормализованный вегетационный индекс), ENVI (Enhanced Vegetation Index, усовершенствованный вегетационный индекс, индекс был разработан как улучшение NDVI путем оптимизации сигнала растительности в областях с высоким индексом листовой поверхности (LAI)). Дополнительно использовались данные радарной топографической съемки (Shuttle radar topographic mission, SRTM) и базовые топографические индексы, которые можно рассчитать с помощью SAGA GIS (<https://saga-gis.sourceforge.io/en/>): крутизна склона, экспозиция склона, горизонтальная и вертикальная кривизны, индекс конвергенции, общая площадь водосбора, топографический индекс влажности. Обучение проводилось по 100 000 точкам, проверка — по 19 171 точкам. Для данной маски общая точность распознавания составила 91.7%.

(2) *Маска используемых и зарастающих сельскохозяйственных земель* была получена как один из слоев карты неиспользуемых сельхозземель, потенциально пригодных для выращивания леса [1]. При создании карты опирались на синтез нескольких других продуктов (маски лесного покрова, заселенных земель, болот) и пороговые значения колебаний нормализованного индекса водности (Normalized Difference Water Index, NDWI), полученного в результате анализа доступных коллекций спутниковых снимков Landsat [1]. Пороговые значения для разделения обрабатываемых и заброшенных полей определялись экспертным образом.

Обе маски имеют недостатки, прежде всего проявляющиеся в зонах, характеризующихся существенным снижением сельскохозяйственной

активности за последние 30 лет. В таких зонах появляются ложноположительные решения. Разрешение 30 м существенно выше, чем разрешение моделируемых карт секвестрации органического углерода и позволяет рассматривать отображение этих масок на рабочее разрешение 1 км как вероятностный процесс [3]. Каждый пиксель новой маски состоял из примерно 1110 пикселей масок с разрешением 30 м. Количество пикселей, маркированных на этих масках как “поле”, определяло вероятность отнесения конкретного пикселя новой километровой маски к классу “поле”. Исходя из этого, всем пикселям новой маски были присвоены категории от 1 до 10, где категория 1 соответствует тому, что поля занимают 10% площади, а категория 10 — 100%.

Для выявления территорий с активным сельскохозяйственным использованием необходимо было выделить территориальные инварианты преобразования солнечной энергии поверхностью. Эта оценка проводилась на основе временного ряда 2018–2020 гг. продуктов со спутника MODIS MOD13A1.006 Terra Vegetation Indices (<https://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov/missions-and-measurements/products/MOD13A1>), а также MOD17A2H.006: Terra Gross Primary Productivity (<https://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov/missions-and-measurements/products/MOD17A2H/-2022>). Участки, находящиеся в интенсивном сельскохозяйственном использовании, должны демонстрировать резкий колебательный режим функционирования (высокое варьирование вегетационных индексов и валовой первичной продуктивности), тогда как угодья, выведенные из оборота, будут более инертны (будут наблюдаться небольшие изменения). Для выявления форм динамики была проведена процедура сокращения размерности данных на основе метода главных компонент для каждого года наблюдений (2018, 2019, 2020). Критерием выступало сохранение 75% дисперсии на главных компонентах. Таким образом, были выделены инварианты агроэкологических состояний. Интегральный показатель за 3 года был рассчитан на основе полученных инвариант, для которых была произведена дискриминация категоризованных значений (1–10), полученных в результате объединения двух описанных выше масок географически.

Таким образом, была получена вероятностная карта доли пашни в каждом километровом пикселе. В дальнейшем анализе использовали пиксели, где такое значение превысило 50%. Таким образом была получена актуальная маска пахотных земель России, соответствующая 2020 г. Пахотные почвы, согласно полученной в ходе исследования *маски пахотных земель России*, занимают 110.9 млн га, что составляет 6.5% от земельного фонда России (1712.5 млн га).

Климатические данные. Источником климатических данных стал массив Climatic Research Unit (CRU) TS v4.05, 1901–2020 Отдела исследования климата Университета Восточной Англии [12]. Данные находятся в открытом доступе и имеют пространственное разрешение около 50 км² (0.5/0.5°) (<https://crudata.uea.ac.uk>). Значения получены путем интерполяции данных наблюдений практически всей общедоступной сети наземных метеорологических станций. По извлеченным из базы данных CRU ежедневным климатическим данным за период 1980–2020 гг. были рассчитаны среднемесячные значения температуры (°C), осадков (мм) и эвапотранспирации по Пенману–Монтейту (мм) за два периода: 1980–2000 и 2001–2020 гг.

Почвенные данные. В качестве начальной точки для моделирования запасов углерода на 2000 г. была использована национальная карта запасов почвенного органического углерода на глубине 0–30 см (т С/га) [7, 10]. Данные по пашне были получены путем наложения маски пахотных земель на эту карту. Корректировка на снижение запасов в пахотных почвах по сравнению с нативными не делалась.

Данные по содержанию фракции ила (частицы размером менее 0.002 мм) с разрешением 250 м были получены из коллекции карт свойств почв для всего мира SoilGrids250m версия 2.0 [17].

Данные о растительном покрове. Ежемесячная оценка наличия и распределения растительного покрова была произведена с помощью Google Earth Engine на основе временного ряда 2013–2020 гг. продуктов MOD13A1.006 Terra Vegetation Indices (<https://landsweb.modaps.eosdis.nasa.gov/missions-and-measurements/products/MOD13A1>), который обеспечивает значение вегетационных индексов NDVI каждого пикселя с разрешением 500 м. Рассматривая временной ряд спутниковых снимков, можно оценить долю изображений со значениями NDVI, превышающими заданный порог, что указывает на активный рост растительности. При создании карт секвестрации было использовано пороговое значение 0.5, рекомендованное для Европы [27].

Оценки количества поступающих органических остатков. Расчеты основаны на предположении, что изменения в поступлении углерода в почву связаны с изменениями в чистой первичной продукции (Net Primary Production – NPP) [25]. Зная NPP для интересующих нас лет и количество поступивших органических остатков в начальный период, можно рассчитать количество поступивших органических остатков в любой период, исходя из предположения о пропорциональной связи количества органических остатков и NPP при сценарии неизменного хозяйствования:

$$C_t = \frac{C_{t-1} \text{NPP}_t}{\text{NPP}_{t-1}}, \quad (1)$$

где C – поступление углерода в т за год, NPP – чистая первичная продукция в т С/га, t – интересующий год, $t-1$ – предшествующий год. На первом этапе моделирования C представляет “исходное” среднегодовое поступление углерода по сценарию BAU на 2000 г.

Расчеты NPP в период 2001–2020 гг. производились на основе данных по температуре, осадкам и длительности вегетации по модели MIAMI [11, 14]:

$$\text{NPP} = \min(\text{NPP}_T, \text{NPP}_P), \quad (2)$$

$$\text{NPP}_T = \frac{3000}{1 + e^{1.315 - 0.119T}}, \quad (3)$$

$$\text{NPP}_P = 3000 * 1 - e^{-0.000664P}, \quad (4)$$

где NPP выражен в г сухой массы на м² в год, T – среднегодовая температура в °C и P – среднегодовая сумма осадков в мм. Сначала определяется NPP по температурному показателю, затем по количеству осадков, а итоговым считается наименьший из них. Полученное значение NPP пересчитывается в т С/га в год умножением на коэффициент 0.0048.

Поступление углерода по сценариям SSM рассчитывали как процентное увеличение по сравнению с исходными данными BAU, т.е. поступление углерода с растительными остатками увеличивалось на соответствующий процент.

Способность к разложению поступающего растительного материала. Для оценки соотношения разлагаемого растительного материала к устойчивому в модели было использовано значение 1.44, рекомендованное ФАО для сельскохозяйственных культур и улучшенных лугопастбищных угодий [27].

Расчет итоговых карт секвестрации почвенного углерода и карт неопределенности. После моделирования были получены: карта, показывающая запасы углерода, соответствующие равновесному состоянию пулов на 2020 г. (рис. 1), 18 прогнозных карт и 10 карт, оценивающих неопределенности прогнозирования. Четыре карты **абсолютной скорости секвестрации почвенного углерода (ASR)** (т С/га/год) [27] были рассчитаны как разница между запасами почвенного углерода в 2040 г. и запасами в 2020 г., деленная на 20 лет, в соответствии со сценариями неизменного хозяйствования (сценарий BAU) и с увеличением поступления органического вещества на 5% (сценарий SSM1), 10% (сценарий SSM2) и 20% (сценарий SSM3):

$$\text{ASR}_i = \frac{\text{SOC}_{i,2040} - \text{SOC}_{i,2020}}{20} \quad (5)$$

где i – один из сценариев: BAU, SSM1, SSM2, SSM3; ASR_i – абсолютная скорость секвестрации

для одного из сценариев; $SOC_{i,2040}$ и $SOC_{i,2020}$ — это запасы почвенного углерода в 2040 г. и 2020 г., соответственно для того же сценария.

Далее были получены три карты **относительной скорости секвестрации почвенного углерода (RSR)** [27], как разница ASR за период в 2020–2040 гг. по сценарию SSM1,2,3 по сравнению с неизменным хозяйствованием (BAU).

$$RSR_j = ASR_j - ASR_{BAU}, \quad (6)$$

где j — один из сценариев: SSM1, SSM2, SSM3; RSR_j — относительная скорость секвестрации для одного из сценариев; ASR_j и ASR_{BAU} — абсолютные скорости секвестрации для того же сценария j и BAU.

Также была построена серия вспомогательных карт: 4 карты запасов почвенного углерода (т/га) в 2040 г. для всех сценариев; 4 карты абсолютных различий в запасах почвенного углерода (т/га) в 2040 г. для всех сценариев; 3 карты относительных различий в запасах почвенного углерода (т/га) для сценариев SSM.

Неопределенность картографирования рассчитывали методом Монте-Карло. Для прогнозных карт рассчитано ожидаемое значение запасов почвенного органического углерода для различных сценариев и 95% доверительный интервал. Неопределенность оценена в процентах как половина доверительного интервала, деленная на среднее значение:

$$\varepsilon = \frac{t_{95\%} s}{\bar{x}} 100\%, \quad (7)$$

где ε — относительная неопределенность моделирования, %; s — стандартное отклонение, $t_{95\%}$ — критерий Стьюдента для доверительной вероятности 95%, $\bar{x}$ — среднее значение.

Расчет статистических показателей, характеризующих потенциал секвестрации почвенного углерода. На основе описанных выше карт были рассчитаны статистические показатели для ASR и RSR как для территории всей России, так и для каждой зоны на основе карты почвенно-экологического районирования России [6], а также для всех субъектов РФ. Горные провинции были объединены в одну область горных территорий. В качестве оценки среднего бралась медиана. Результаты представлены в табл. 1 и 3.

Также были рассчитаны показатели суммарных абсолютной (SASR) и относительной (RSR) скорости секвестрации (т С/год) для каждой природной зоны и подзоны, а также по субъектам РФ для разных сценариев устойчивого управления почвенными ресурсами.

$$SASR_k = ASR_k \cdot S_k, \quad (8)$$

$$SRSR_k = RSR_k \cdot S_k, \quad (9)$$

где $SASR_k$ и $SRSR_k$ — суммарная абсолютная и суммарная относительная, соответственно, скорости секвестрации почвенного углерода по контуру k ; ASR_k и RSR_k — средняя абсолютная и средняя

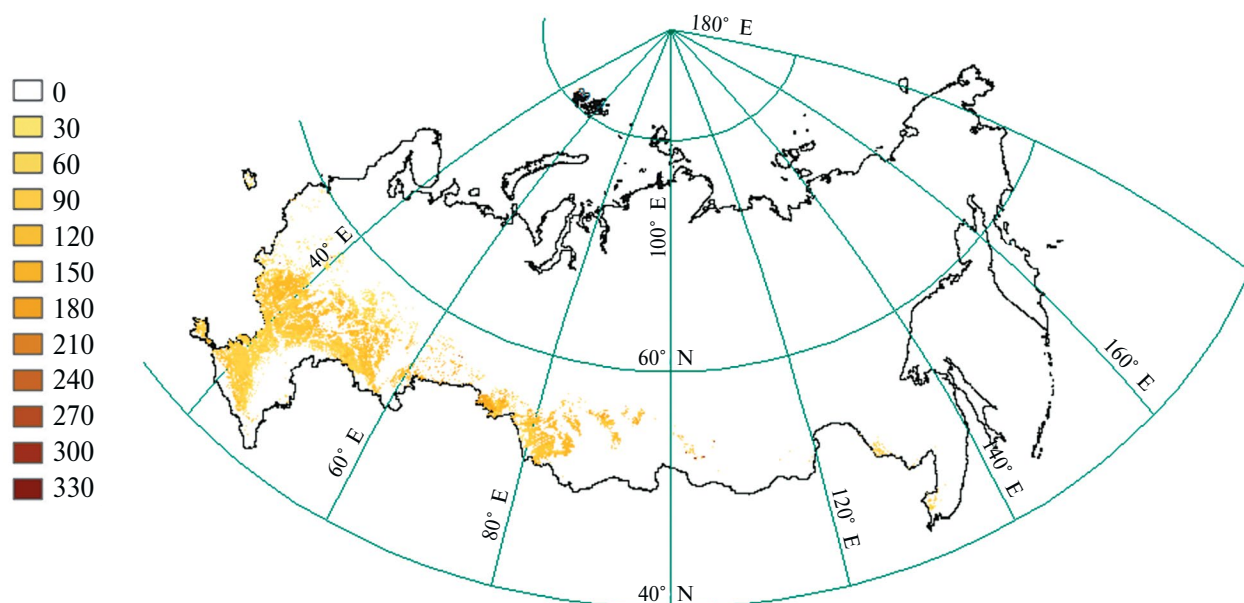


Рис. 1. Запасы углерода в 30-сантиметровом верхнем слое пахотных почв РФ в 2020 г., соответствующие равновесному состоянию пулов органического углерода, т/га.

относительная, соответственно, скорости секвестрации почвенного углерода по контуру k ; S_k — площадь контура k . Результаты представлены в табл. 2 и 4.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Прогноз скорости секвестрации почвенного углерода пахотными почвами России. Средняя абсолютная скорость секвестрации почвенного углерода для пахотных почв России в слое 0–30 см составляет 0.05 т С/га в год для сценария неизменного хозяйствования (BAU), а для трех других сценариев, может достигать 0.11, 0.16, 0.27 т С/га в год, соответственно (табл. 1–4, рис. 1, 2). Что касается относительной секвестрации почвенного углерода (RSR), результаты показали положительный эффект в случае реализации любых из трех сценариев углеродосберегающими практиками SSM1,2,3 по сравнению с BAU: за 20 лет запас почвенного углерода может потенциально увеличиться на 1.0 т С/га для SSM1, на 2.0 т С/га для SSM2 и 4.2 т С/га для SSM3.

Суммарно для всей территории России скорость накопления углерода пахотными почвами составляет 8.5 Мт С в год, а для трех сценариев

углерод SSM1,2,3 — 12.9, 17.0 и 25.5 Мт С в год, соответственно. Таким образом, за 20 лет к 2040 г. все пахотные почвы России могут накопить в слое 0–30 см от 170 до 510 Мт С в зависимости от сценария землепользования.

Расчеты средней скорости абсолютной секвестрации почвенного органического углерода (ASR) прогнозируют его накопление во всех природных зонах для всех изученных сценариев, кроме зоны светло-каштановых и бурых почв полупустыни при сценарии неизменного хозяйствования (BAU). Там прогнозируется небольшое снижение запасов почвенного углерода на 0.002 т С/год (рис. 2, 3), т.е. практически равное нулю. Наибольшая скорость секвестрации наблюдается в подзонах глееподзолистых и подзолистых почв северной и средней тайги, что, скорее всего, связано с гидроморфизмом, а также в зонах серых лесных почв и оподзоленных, выщелоченных и типичных черноземов лесостепи. Однако из-за разной площади пахотных земель в двух зонах из 83% от суммарной секвестрации на зону оподзоленных, выщелоченных и типичных черноземов и серых лесных почв лесостепи приходится 49%, а на зону обыкновенных и южных черноземов степи — 34%.

Таблица 1. Средняя абсолютная (ASR) и средняя относительная (RSR) скорости секвестрации почвенного углерода для пахотных почв России по природным зонам и подзонам для разных сценариев устойчивого управления почвенными ресурсами, т С/га в год

Зона или подзона	S , км ²	ASR				RSR		
		BAU	SSM1	SSM2	SSM3	SSM1	SSM2	SSM3
Г Подзона глееподзолистых почв, глееземов и подзолов северной тайги	14	0.076	0.094	0.120	0.171	0.0186	0.0443	0.0951
Д Подзона подзолистых почв средней тайги	260	0.057	0.062	0.074	0.098	0.0134	0.0198	0.0440
Е Зона дерново-подзолистых почв южной тайги	51432	0.044	0.069	0.084	0.116	0.0191	0.0340	0.0636
Л Зона серых лесных почв лиственных лесов	112554	0.068	0.097	0.124	0.177	0.0300	0.0545	0.1058
М Зона оподзоленных, выщелоченных и типичных черноземов и серых лесных почв лесостепи	399015	0.068	0.117	0.160	0.247	0.0466	0.0921	0.1818
Н Зона обыкновенных и южных черноземов степи	438178	0.024	0.057	0.092	0.170	0.0390	0.0783	0.1573
О Зона темно-каштановых и каштановых почв сухой степи	65759	0.018	0.048	0.078	0.136	0.0320	0.0604	0.1182
П Зона буроземов и подзолисто-буроземных почв хвойно-широколиственных и широколиственных лесов	14654	0.037	0.046	0.098	0.194	0.0159	0.0614	0.1584
Р Зона светло-каштановых и бурых почв полупустыни	5257	–0.002	0.042	0.073	0.139	0.0379	0.0678	0.1333
Горные территории	10215	0.075	0.117	0.170	0.278	0.0416	0.0899	0.1906

Примечание. В качестве оценки среднего бралась медиана. S — площадь пахотных земель.

Таблица 2. Суммарная абсолютная (SASR) и суммарная относительная (SRSR) скорости секвестрации почвенного углерода пахотных почв России по природным зонам и подзонам для разных сценариев устойчивого управления почвенными ресурсами Кт С в год

Зона или подзона	SASR				SRSR		
	BAU	SSM1	SSM2	SSM3	SSM1	SSM2	SSM3
Г Подзона глееподзолистых почв, глееземов и подзолов северной тайги	0.1	0.1	0.2	0.2	0.0	0.1	0.1
Д Подзона подзолистых почв средней тайги	1.5	1.9	2.2	3.0	0.4	0.8	1.5
Е Зона дерново-подзолистых почв южной тайги	271.0	401.1	488.6	664.6	132.4	217.7	393.6
Л Зона серых лесных почв лиственных лесов	811.9	1160.5	1457.5	2047.6	348.8	645.6	1235.8
М Зона оподзоленных, выщелоченных и типичных черноземов и серых лесных почв лесостепи	4165.0	5948.1	7656.8	11072.0	1784.7	3491.8	6907.0
Н Зона обыкновенных и южных черноземов степи	2940.4	4750.0	6516.6	10055.9	1811.4	3576.1	7115.4
О Зона темно-каштановых и каштановых почв сухой степи	172.6	387.2	578.8	966.8	214.6	406.2	794.1
П Зона буроземов и подзолисто-буроземных почв хвойно-широколиственных и широколиственных лесов	35.4	57.7	131.7	275.8	22.7	96.2	240.4
Р Зона светло-каштановых и бурых почв полупустыни	2.3	23.9	40.5	73.5	21.6	38.2	71.2
Горные территории	125.8	170.2	218.4	316.9	44.7	92.6	191.0
Суммарно	8526.0	12900.5	17091.2	25476.3	4381.3	8565.3	16950.1

Таблица 3. Средняя абсолютная (ASR) и средняя относительная (RSR) скорости секвестрации почвенного углерода в пахотных почвах России по субъектам РФ для разных сценариев устойчивого управления почвенными ресурсами, т С/га в год

Субъект РФ	S, км ²	ASR				RSR		
		BAU	SSM1	SSM2	SSM3	SSM1	SSM2	SSM3
Алтайский край	85310	0.235	0.281	0.327	0.422	0.0442	0.0907	0.1876
Амурская область	8351	0.044	0.054	0.106	0.204	0.0091	0.0616	0.1593
Архангельская область	89	0.060	0.061	0.072	0.095	0.0057	0.0134	0.0385
Астраханская область	1501	−0.011	0.043	0.078	0.147	0.0553	0.0900	0.1589
Белгородская область	21375	0.011	0.052	0.089	0.163	0.0391	0.0775	0.1528
Брянская область	9958	0.056	0.095	0.119	0.166	0.0389	0.0630	0.1072
Владимирская область	3912	0.043	0.065	0.083	0.119	0.0211	0.0403	0.0762
Волгоградская область	46112	0.015	0.051	0.085	0.151	0.0353	0.0675	0.1337
Вологодская область	1228	0.075	0.064	0.077	0.100	0.0035	0.0057	0.0253
Воронежская область	42433	−0.004	0.036	0.076	0.158	0.0413	0.0818	0.1647
Еврейская АО	1000	0.052	0.059	0.101	0.192	0.0135	0.0552	0.1436
Забайкальский край	788	0.100	0.249	0.276	0.342	0.1381	0.1682	0.2406
Ивановская область	1513	0.031	0.052	0.068	0.099	0.0205	0.0372	0.0677
Ингушская Республика	1137	0.044	0.071	0.113	0.200	0.0262	0.0695	0.1565
Иркутская область	8838	0.224	0.243	0.280	0.342	0.0194	0.0553	0.1185
Кабардино-Балкарская Р	4800	0.039	0.072	0.120	0.204	0.0345	0.0789	0.1619
Калининградская область	2716	−0.023	0.126	0.147	0.195	0.1495	0.1706	0.2180

Продолжение табл. 3

Субъект РФ	S, км ²	ASR				RSR		
		BAU	SSM1	SSM2	SSM3	SSM1	SSM2	SSM3
Калужская область	3504	0.074	0.104	0.124	0.161	0.0293	0.0490	0.0862
Карачаево-Черкесская Р	2548	0.027	0.067	0.118	0.214	0.0417	0.0942	0.1942
Кемеровская область	14467	0.289	0.340	0.393	0.499	0.0466	0.1006	0.2086
Кировская область	10126	0.037	0.050	0.064	0.094	0.0129	0.0272	0.0571
Костромская область	1171	0.029	0.048	0.062	0.089	0.0194	0.0335	0.0608
Краснодарский край	44670	−0.025	0.028	0.071	0.156	0.0499	0.0925	0.1758
Красноярский край	28250	0.277	0.302	0.350	0.445	0.0334	0.0787	0.1717
Курганская область	8507	0.032	0.084	0.130	0.221	0.0502	0.0967	0.1868
Курская область	25005	0.083	0.129	0.176	0.270	0.0450	0.0952	0.1897
Ленинградская область	1165	0.029	0.069	0.082	0.118	0.0402	0.0532	0.0888
Липецкая область	20811	0.067	0.119	0.169	0.269	0.0510	0.1016	0.2022
Московская область	6213	0.082	0.100	0.118	0.153	0.0223	0.0410	0.0760
Нижегородская область	16776	0.066	0.092	0.119	0.174	0.0242	0.0514	0.1065
Новгородская область	768	0.066	0.072	0.086	0.113	0.0054	0.0176	0.0440
Новосибирская область	42976	0.282	0.334	0.386	0.489	0.0493	0.1001	0.2022
Омская область	39191	0.299	0.355	0.411	0.524	0.0530	0.1086	0.2219
Оренбургская область	65225	0.033	0.059	0.095	0.169	0.0333	0.0724	0.1492
Орловская область	21246	0.116	0.161	0.206	0.304	0.0463	0.0972	0.1998
Пензенская область	21750	0.030	0.077	0.120	0.211	0.0471	0.0898	0.1810
Пермский край	4689	0.053	0.081	0.097	0.125	0.0275	0.0444	0.0742
Приморский край	5266	−0.024	−0.004	0.040	0.134	0.0217	0.0623	0.1536
Псковская область	1242	0.078	0.080	0.097	0.133	0.0381	0.0468	0.0812
Республика Адыгея	2287	−0.037	0.023	0.083	0.206	0.0603	0.1208	0.2442
Республика Алтай	155	0.228	0.272	0.321	0.422	0.0467	0.0900	0.1940
Республика Башкортостан	37198	0.057	0.100	0.133	0.211	0.0420	0.0808	0.1625
Республика Бурятия	202	0.197	0.252	0.288	0.353	0.0519	0.0890	0.1579
Республика Дагестан	1099	0.028	0.073	0.118	0.204	0.0475	0.0918	0.1772
Республика Калмыкия	4312	−0.010	0.032	0.061	0.115	0.0395	0.0659	0.1222
Республика Карелия	99	0.064	0.095	0.110	0.145	0.0308	0.0457	0.0814
Республика Коми	12	0.046	0.053	0.065	0.094	0.0071	0.0194	0.0488
Республика Марий Эл	4771	0.043	0.056	0.072	0.104	0.0131	0.0295	0.0615
Республика Мордовия	12305	0.050	0.093	0.127	0.197	0.0419	0.0750	0.1456
Республика Северная Осетия-Алания	2667	0.037	0.061	0.103	0.195	0.0261	0.0689	0.1520
Республика Татарстан	44208	0.072	0.104	0.131	0.186	0.0333	0.0600	0.1145
Республика Тыва	7	0.132	0.164	0.192	0.260	0.0316	0.0601	0.1285
Республика Хакасия	1064	0.270	0.260	0.306	0.403	0.0243	0.0443	0.1331
Ростовская область	75229	−0.007	0.031	0.062	0.127	0.0368	0.0682	0.1327
Рязанская область	16674	0.079	0.119	0.157	0.235	0.0460	0.0930	0.1777
Самарская область	35909	0.052	0.090	0.131	0.211	0.0375	0.0789	0.1592
Саратовская область	60872	0.028	0.062	0.094	0.168	0.0343	0.0691	0.1373
Сахалинская область	18	0.087	0.097	0.148	0.241	0.0096	0.0612	0.1538
Свердловская область	7019	0.041	0.082	0.115	0.181	0.0364	0.0622	0.1154
Смоленская область	3544	0.071	0.084	0.100	0.134	0.0131	0.0280	0.0614
Ставропольский край	47420	0.012	0.049	0.085	0.162	0.0368	0.0737	0.1501

Окончание табл. 3

Субъект РФ	S, км ²	ASR				RSR		
		BAU	SSM1	SSM2	SSM3	SSM1	SSM2	SSM3
Тамбовская область	26702	0.011	0.054	0.089	0.168	0.0452	0.0839	0.1642
Тверская область	3185	0.104	0.102	0.116	0.144	0.0088	0.0145	0.0422
Томская область	3344	0.166	0.196	0.218	0.272	0.0308	0.0520	0.1076
Тульская область	15753	0.143	0.198	0.252	0.359	0.0494	0.1035	0.2149
Тюменская область	8571	0.038	0.076	0.104	0.153	0.0379	0.0615	0.1119
Удмуртская республика	10023	0.052	0.079	0.097	0.134	0.0266	0.0449	0.0817
Ульяновская область	14896	0.069	0.114	0.160	0.250	0.0468	0.0924	0.1819
Хабаровский край	295	0.061	0.080	0.123	0.209	0.0268	0.0583	0.1485
Челябинская область	18666	0.027	0.072	0.110	0.194	0.0447	0.0824	0.1660
Чеченская Республика	1651	0.034	0.069	0.111	0.198	0.0327	0.0746	0.1605
Чувашская Республика	8702	0.061	0.081	0.102	0.148	0.0193	0.0412	0.0871
Ярославская область	2603	0.042	0.054	0.069	0.098	0.0146	0.0282	0.0557
Республика Крым	11833	−0.026	0.018	0.059	0.142	0.0463	0.0999	0.1887

Примечание. В качестве оценки среднего брали медиану. S – площадь пахотных земель.

Таблица 4. Суммарная абсолютная (SASR) и суммарная относительная (SRSR) скорости секвестрации почвенного углерода пахотных почв России по субъектам РФ для разных сценариев устойчивого управления почвенными ресурсами, Кт С в год

Субъект РФ	SASR				SRSR		
	BAU	SSM1	SSM2	SSM3	SSM1	SSM2	SSM3
Алтайский край	1915.8	2287.7	2663.2	3441.4	372.0	747.4	1525.6
Амурская область	40.7	50.6	97.3	185.7	10.1	56.7	145.0
Архангельская область	0.6	0.6	0.7	1.0	0.1	0.2	0.5
Астраханская область	−1.6	6.7	12.1	22.8	8.3	13.7	24.4
Белгородская область	32.9	116.9	197.1	355.1	84.0	164.2	322.1
Брянская область	53.7	92.6	114.3	158.0	38.9	60.6	104.3
Владимирская область	18.5	26.8	34.2	48.4	8.3	15.7	29.9
Волгоградская область	69.3	233.7	384.1	689.2	164.4	314.8	619.9
Вологодская область	9.6	8.6	10.2	13.2	0.2	0.7	3.6
Воронежская область	−2.1	172.3	331.2	654.3	174.4	333.3	656.4
Еврейская АО	4.6	5.8	10.2	19.6	1.3	5.6	15.0
Забайкальский край	8.4	19.4	21.8	27.3	11.1	13.4	18.9
Ивановская область	5.1	8.3	10.7	15.6	3.2	5.7	10.5
Ингушская республика	5.1	7.8	12.7	22.5	2.7	7.6	17.3
Иркутская область	197.5	215.0	248.1	305.8	18.4	50.6	108.3
Кабардино-Балкарская Р	14.6	34.2	57.0	101.9	19.7	42.4	87.3
Калининградская область	−5.7	36.1	42.5	56.6	41.9	48.3	62.3
Калужская область	27.3	37.1	44.2	58.2	9.8	16.8	30.9
Карачаево-Черкесская Р	5.1	18.4	31.1	55.2	13.3	26.0	50.1
Кемеровская область	389.7	451.2	522.5	661.0	61.6	132.8	271.3
Кировская область	40.7	54.8	70.2	102.2	14.0	29.5	61.5
Костромская область	3.4	5.9	7.5	10.9	2.4	4.1	7.5

Продолжение табл. 4

Субъект РФ	SASR				SRSR		
	BAU	SSM1	SSM2	SSM3	SSM1	SSM2	SSM3
Краснодарский край	−104.3	122.3	331.5	735.6	226.6	435.8	840.0
Красноярский край	760.7	852.0	991.0	1261.7	92.7	230.3	500.9
Курганская область	33.3	73.8	108.5	177.8	40.5	75.1	144.5
Курская область	206.6	317.5	431.0	649.3	110.9	224.4	442.7
Ленинградская область	4.4	8.8	10.5	15.0	4.3	6.1	10.6
Липецкая область	129.1	230.6	322.5	506.5	101.5	193.4	377.4
Московская область	49.7	63.8	78.4	107.2	14.2	28.8	57.5
Нижегородская область	109.0	155.6	201.9	293.6	46.6	92.9	184.6
Новгородская область	5.3	5.6	6.6	8.7	0.4	1.3	3.4
Новосибирская область	1057.1	1243.8	1435.6	1818.0	187.0	378.6	761.0
Омская область	1095.5	1296.1	1498.4	1896.9	200.8	402.9	801.4
Оренбургская область	216.4	437.3	672.3	1140.7	220.9	455.8	924.3
Орловская область	246.0	345.6	436.3	616.2	99.6	190.3	370.2
Пензенская область	67.1	169.9	259.6	446.7	102.8	192.5	379.7
Пермский край	26.7	39.2	47.4	62.2	12.5	20.8	35.6
Приморский край	−11.9	−0.6	22.0	67.9	11.3	34.0	79.9
Псковская область	8.4	11.6	14.5	21.0	3.4	6.1	12.6
Республика Адыгея	−8.0	4.4	18.9	46.0	12.5	26.9	54.1
Республика Алтай	3.3	4.1	4.8	6.3	0.7	1.4	2.9
Республика Башкортостан	205.8	365.8	504.6	787.9	160.1	298.8	582.1
Республика Бурятия	3.9	5.0	5.7	7.1	1.0	1.8	3.2
Республика Дагестан	2.8	7.7	12.5	21.7	4.9	9.7	18.9
Республика Калмыкия	−4.0	13.5	25.8	51.4	17.5	29.8	55.4
Республика Карелия	0.7	1.0	1.2	1.5	0.3	0.5	0.9
Республика Коми	0.1	0.1	0.1	0.1	0.0	0.0	0.1
Республика Марий Эл	21.1	27.4	35.1	50.6	6.4	14.0	29.5
Республика Мордовия	61.2	110.4	148.4	227.6	49.2	87.2	166.4
Республика Северная Осетия-Алания	7.9	14.7	26.8	50.3	7.0	18.9	42.4
Республика Татарстан	314.4	475.8	621.4	905.6	161.4	307.0	591.2
Республика Тыва	0.1	0.1	0.1	0.2	0.0	0.0	0.1
Республика Хакасия	26.4	27.2	31.8	40.8	1.3	5.3	14.4
Ростовская область	−40.7	234.9	466.6	941.0	275.5	507.3	981.7
Рязанская область	135.2	206.3	275.0	410.7	71.2	139.8	275.6
Самарская область	187.2	325.0	462.0	730.4	137.8	274.8	543.2
Саратовская область	164.5	375.3	577.7	984.0	210.8	413.2	819.5
Сахалинская область	0.2	0.2	0.3	0.4	0.0	0.1	0.3
Свердловская область	35.6	61.7	81.6	121.2	26.0	45.9	85.6
Смоленская область	28.6	33.0	39.5	52.6	4.6	10.9	24.0
Ставропольский край	59.8	232.7	407.2	757.3	172.9	347.4	697.5
Тамбовская область	34.5	148.0	240.0	431.9	113.5	205.5	397.4
Тверская область	31.4	32.1	36.6	45.2	1.3	5.1	13.8

Субъект РФ	SASR				SRSR		
	BAU	SSM1	SSM2	SSM3	SSM1	SSM2	SSM3
Томская область	57.9	64.8	73.7	92.3	7.1	15.9	34.4
Тульская область	219.6	298.8	375.8	527.0	79.2	156.1	307.4
Тюменская область	36.4	68.2	92.4	140.8	31.8	56.1	104.5
Удмуртская республика	57.1	82.0	101.8	141.0	24.9	44.7	83.9
Ульяновская область	99.6	164.0	226.0	349.0	64.4	126.4	249.4
Хабаровский край	2.0	2.2	3.6	6.4	0.5	1.5	4.3
Челябинская область	49.4	129.5	200.0	350.8	80.1	150.6	301.4
Чеченская республика	5.2	11.0	18.0	31.9	5.8	12.8	26.7
Чувашская Республика	56.2	78.5	100.8	145.5	22.2	44.5	89.2
Ярославская область	13.3	17.0	21.4	29.6	3.8	8.1	16.3
Республика Крым	−67.9	24.4	75.2	175.3	92.3	143.1	243.1

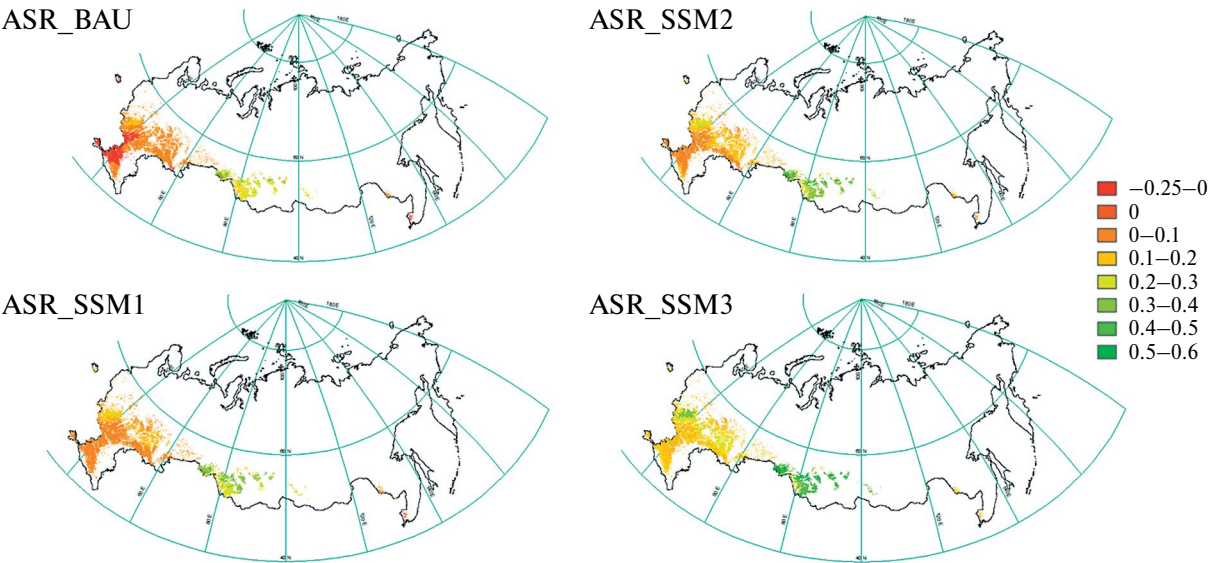


Рис. 2. Абсолютные показатели скорости секвестрации почвенного углерода (ASR) т С га/год при сохранении неизменного хозяйствования (BAU) и при трех сценариях прироста почвенного углерода в результате реализации стратегий устойчивого управления почвенными ресурсами (SSM 1–3), где предполагалось увеличение поступающего в почву органического вещества на 5, 10 и 20% соответственно.

При условии выполнения сценариев реализации практик устойчивого управления почвенными ресурсами среди субъектов Российской Федерации наибольший потенциал секвестрации почвенного органического углерода пахотными почвами имеют следующие регионы: Алтайский край, Омская область, Новосибирская область, Красноярский край. Это связано, с одной стороны, с большой площадью пахотных земель, а с другой – с высокой скоростью секвестрации, в 2–10 раз превышающей значения скоростей для других субъектов с положительной динамикой.

В ряде субъектов РФ: Краснодарский край, Республика Крым, Ростовская область, Приморский край, Республика Адыгея и Калининградская область – наблюдаются небольшие отрицательные значения скоростей секвестрации. Из-за достаточно больших площадей пахотных почв в этих субъектах должны быть приняты меры по внедрению практики устойчивого управления почвенными ресурсами. При увеличении поступления органического углерода в почву даже на 5% тенденция изменится и будет происходить секвестрация углерода почвами.

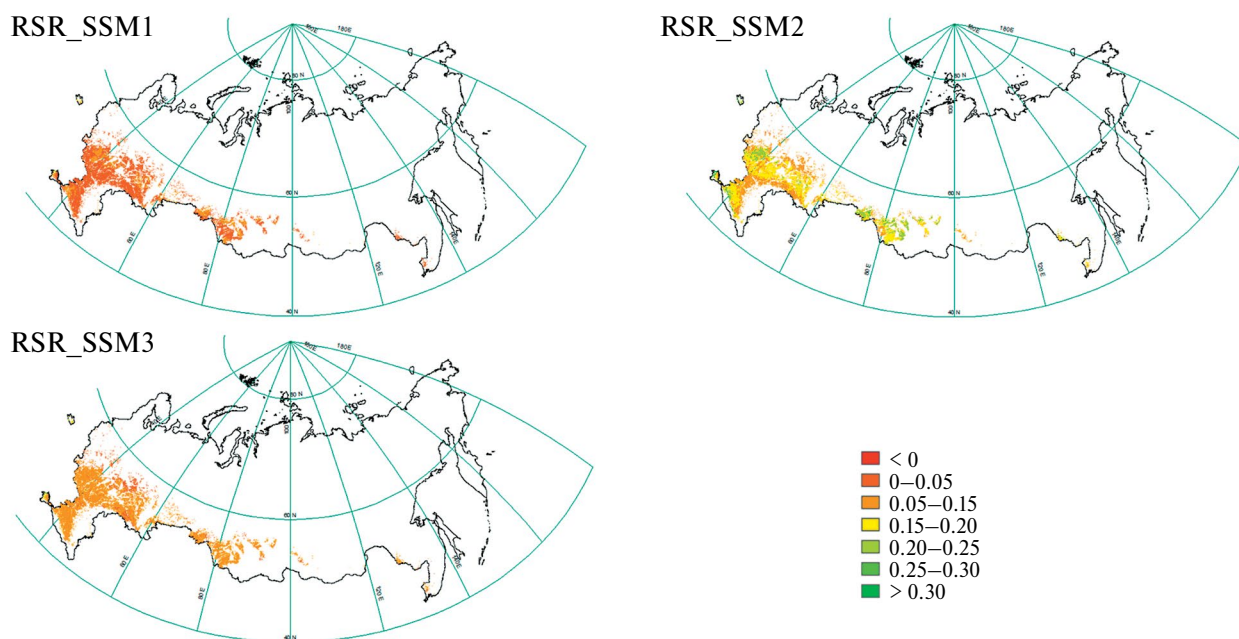


Рис. 3. Относительные показатели скорости секвестрации почвенного углерода (RSR) для трех сценариев реализации стратегий устойчивого управления почвенными ресурсами (SSM 1–3), где предполагалось увеличение поступающего в почву органического вещества на 5, 10 и 20%.

Сравнение результатов с предыдущими исследованиями. Полученные расчеты по скорости и потенциалу секвестрации сравнивали с результатами, полученными при использовании модели RothC для прогноза изменения запасов почвенного органического углерода пахотными почвами Европейской территории России до 2070 г. [5, 19]. Основными отличиями ранее проведенного исследования при работе модели являлся расчет поступления С. Базовым периодом выбран 1990–2000 гг. для сценария неизменного хозяйствования. Поступление углерода в почву было рассчитано на основе средних урожайных данных за данный период по субъектам РФ, с составлением севооборота, исходя из структуры посевных площадей региона и ареалов распространения зерновых и пропашных культур. Адаптационные сценарии рассчитаны на основе экономической региональной модели. Один из сценариев обеспечивал постоянство запасов почвенного органического углерода или их рост. Поступление углерода рассчитано на основе расчетов урожайности динамической моделью Климат-Почва-Урожай с учетом влияния изменения климата и оптимизации условий минерального питания.

Максимальная скорость накопления почвенного органического углерода по ранее проведенному исследованию составляла до 0.2 т/га в год, в наибольшей степени для северо-западного региона Нечерноземной зоны, что существенно ниже полученных оценок для сценария BAU и согласуется с прогнозами по настоящему сценарию SSM3.

Потери органического углерода при неизменном землепользовании предполагались, тем не менее, для черноземной зоны, а не только зоны светло-каштановых и бурых полупустынных почв. Как и в настоящем исследовании, для большого количества контуров удавалось только обеспечить поддержание исходных запасов углерода, либо слабый его прирост, несмотря на возможное увеличение урожайности в условиях будущего климата, даже при реализации сценария BAU.

Относительная секвестрация (RSR) — накопление почвенного углерода при реализации сценариев SSM по сравнению с BAU также сопоставимы с расчетами накопления органического в ранее проведенном исследовании на 0.8–7.0 т/га до 2070 г. при реализации адаптационного сценария по сравнению с BAU. Как видно из рис. 3, при реализации сценария SSM1 RSR для большей части контуров не превышает 0.05 т С/га в год, что может в реальных севооборотах не выявляться из-за межгодовой изменчивости почвенного органического углерода при смене культур и соответствующих изменениях в поступлении углерода.

Другой причиной расхождений между результатами современного и ранее проведенного моделирования может быть неравновесность запасов органического углерода за 20-летний период. Как показали ранее проведенные расчеты, достижение равновесия может не достигаться и после 70-летнего периода моделирования [5]. Это связано с тем,

что в реальности даже в пределах одной области эффективно обеспечивается депонирование углерода только некоторыми контурами, в то время как лишь ослабляется процесс потери для соседних.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В России существует большой потенциал сельского хозяйства по сокращению выбросов парниковых газов на национальном и глобальном уровнях. Согласно данным ФАО, в почвах России содержится почти 20% мировых запасов органического углерода почв (133 Гт С в первых 30 см, в мире — 680 Гт С). Текущие значения скоростей абсолютной и относительной секвестрации почвенного органического углерода пахотными почвами во всех природных зонах и подзонах почвенно-экологического районирования (за исключением одной) и в национальном масштабе слабо положительны. Данные расчетов при реализации сельскохозяйственных практик, способствующих увеличению поступления углерода в почву, показали, что максимальный потенциал секвестрации почвенного углерода пахотными почвами России составляет 25.5 Мт/год. По этому показателю Россия занимает пятое место среди других стран после Бразилии, Китая, США и Индии.

Полученные в рамках работы карты потенциала секвестрации органического углерода было бы корректно называть оценочными, пока не будут проведены повторные измерения с использованием более точных входных климатических, почвенных и данных по растительному покрову, что является глобальным приоритетом для отслеживания изменений почвенного углерода. Учитывая ограничения, полученные результаты и методика их получения, карты могут быть использованы в качестве исходных данных для оценки потенциала секвестрации почвенного углерода на региональном уровне, также в качестве исходного материала для определения методов смягчения последствий изменения климата и вместе с тем для оценки секвестрации и потоков углерода из пахотных почв для согласования с кадастром парниковых газов. Данный подход может быть воспроизведен и усовершенствован по мере получения специфических для страны и региона исходных и детальных локальных данных, а также параметров модели для повышения точности и снижения неопределенности прогнозов почвенного углерода. К настоящему времени получены только предварительные данные. Авторы продолжают расчеты потенциала секвестрации почв России для его уточнения и оценок неопределенностей по всем четырем сценариям.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена 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).

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Глушков И.В., Лупачик В., Прищепов А.В., Потапов П.В., Пукинская 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. С. 35–37.
2. Иванов А.Л., Столбовой В.С. Инициатива “4 промилле” — новый глобальный вызов для почв России // Бюл. Почв. ин-та им. В.В. Докучаева. 2019. Вып. 98. С. 185–202. <https://doi.org/10.19047/0136-1694-2019-98-185-202>
3. Кренке А.Н. Выявление инвариантных состояний агроландшафтов на основе иерархического факторного анализа дистанционной информации // Принципы экологии. 2020. № 3. С. 16–27. <https://doi.org/10.15393/jl.art.2020.10942>
4. Кудеяров В.Н. Роль почв в круговороте углерода // Почвоведение. 2005. № 8. С. 915–923.
5. Романенков В.А., Сиротенко О.Д., Рухович Д.И., Романенко И.А., Шевцова Л.К., Королева П.В. Прогноз динамики запасов органического углерода пахотных земель Европейской территории России. М.: ВНИИА, 2009. 96 с.
6. Урусевская И.С., Алябина И.О., Шоба С.А. Карта почвенно-экологического районирования Российской Федерации. М-б 1 : 8 000 000. Пояснительный текст и легенда к карте. М.: МАКС Пресс, 2020. 100 с.
7. Чернова О.В., Голозубов О.М., Алябина И.О., Щепаченко Д.Г. Комплексный подход к картографической оценке запасов органического углерода в почвах России // Почвоведение. 2021. № 3. С. 273–286. <https://doi.org/10.31857/S0032180X210300>
8. Batjes N.H. Total carbon and nitrogen in the soils of the world // Eur. J. Soil Sci. 1996. V. 47. P. 151–163. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.1996.tb01386.x>

9. Coleman K., Jenkinson D.S. RothC-26.3 – A model for the turnover of carbon in soil // Evaluation of Soil Organic Matter Models. NATO ASI Series. Berlin: Springer, 1996. V. 38. P. 237–246.
https://doi.org/10.1007/978-3-642-61094-3_17
10. FAO, ITPS. Global Soil Organic Carbon Map (GSOCmap) Technical Report. Italy, Rome: FAO, 2018. 162 p.
11. Gottschalk P., Smith J.U., Wattenbach M., Bellarby J., Stehfest E., Arnell N., Osborn T.J., Jones C., Smith P. How will organic carbon stocks in mineral soils evolve under future climate? Global projections using RothC for a range of climate change scenarios // Biogeosciences. 2012. V. 9. P. 3151–3171.
<https://doi.org/10.5194/bg-9-3151-2012>
12. Harris I., Osborn T.J., Jones Ph., Lister D. Version 4 of the CRU TS monthly high-resolution gridded multivariate climate dataset // Scientific Data. 2020. V. 7. P. 109.
<https://doi.org/10.1038/s41597-020-0453-3>
13. Lal R. Soil Carbon Sequestration Impacts on Global Climate Change and Food Security // Science. 2004. V. 304. P. 1623–1627.
<https://doi.org/10.1126/science.1097396>
14. Lieth H. Modeling the Primary Productivity of the World // Primary productivity of the biosphere. Ecological studies, analysis and synthesis. Berlin: Springer, 1975. P. 237–263.
15. Minasny B., Malone B.P., McBratney A.B., Angers D.A., Arrouays D., Chambers A., Chaplo V., et al. Soil carbon 4 per mille // Geoderma. 2017. V. 292. P. 59–86.
<https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2017.01.002>
16. Paustian K., Collier S., Baldock J., Burgess R., Creque J., DeLonge M., Dungait J. et al. Quantifying carbon for agricultural soil management: from the current status toward a global soil information system // Carbon Management. 2019. V. 10. P. 567–587.
<https://doi.org/10.1080/17583004.2019.16332312019>
17. Poggio L., De Sousa L.M., Batjes N.H., Heuvelink G.B.M., Kempen B., Ribeiro E., Rossiter D. SoilGrids 2.0: producing soil information for the globe with quantified spatial uncertainty // Soil. 2021. V. 7. P. 217–240.
<https://doi.org/10.5194/soil-7-217-2021>
18. Romanenko I.A., Romanenkov V.A., Smith P.P., Smith J.U., Sirotenko O.D., Lisovoi N.V., Shevtsova L.K., Rukhovitch D.I., Koroleva P.V. Constructing regional scenarios for sustainable agriculture in European Russia and Ukraine for 2000 to 2070 // Reg Environ Change. 2007. 7. P. 63–77.
<https://doi.org/10.1007/s10113-007-0032-6>
19. Romanenkov V.A., Smith J.U., Smith P., Sirotenko O.D., Rukhovitch D.I., Romanenko I.A. Soil organic carbon dynamics of croplands in European Russia: estimates from the “model of humus balance” // Reg Environ Change. 2007. V. 7. P. 93–104.
<https://doi.org/10.1007/s10113-007-0031-7>
20. Rukhovitch D.I., Koroleva P.V., Vilchevskaya E.V., Romanenkov V., Kolesnikova L. Constructing a spatially-resolved database for modelling soil organic carbon stocks of croplands in European Russia // Reg Environ Change. 2007. 7. P. 51–61.
<https://doi.org/10.1007/s10113-007-0029-1>
21. Sanderman J., Hengl T., Fiske G.J. Soil carbon debt of 12,000 years of human land use // Proc Natl Acad Sci USA. 2017. V. 114. 36. P. 9575–9580.
<https://doi.org/10.1073/pnas.1706103114>
22. Smith P., Powlson D.S., Glendinning M.J., Smith J.U. Preliminary estimates of the potential for carbon mitigation in European soils through no-till farming // Global Change Biology. 2004. V. 4. P. 679–685.
<https://doi.org/10.1046/j.1365-2486.1998.00185.x>
23. Smith P., Powlson D.S., Smith J.U., Falloon P., Coleman K. Meeting Europe’s climate change commitments: quantitative estimates of the potential for carbon mitigation by agriculture // Global Change Biology. 2000. V. 6. P. 525–539.
<https://doi.org/10.1046/j.1365-2486.2000.00331.x>
24. Smith P., Smith J.U., Franko U., Kuka K., Romanenkov V., Shevtsova L. et al. Changes in mineral soil organic carbon stocks in the croplands of European Russia and the Ukraine, 1990–2070; Comparison of three models and implications for climate mitigation // Reg. Environ. Change. 2007. V. 7. P. 105–119.
<https://doi.org/10.1007/s10113-007-0028-2>
25. Smith J.O., Smith P., Wattenbach M., Zaehle S., Hiederer R., Jones R.J.A. et al. Projected changes in mineral soil carbon of European croplands and grasslands, 1990–2080 // Global Change Biology. 2005. V. 11. P. 2141–2152.
<https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2005.001075.x>
26. Stolbovoy V., Ivanov A. Carbon Balance in Soils of Northern Eurasia // Soil Carbon. Progress in Soil Science. Cham: Springer. 2014. P. 381–391.
https://doi.org/10.1007/978-3-319-04084-4_38
27. Technical specifications and country guidelines for Global Soil Organic Carbon Sequestration Potential Map (GSOCseq). Rome: FAO, 2020. 34 p.
28. Trenberth K.E., Smith L. The mass of the atmosphere: A constraint on global analyses // J. Climate. 2005. V. 18. P. 864–875.
<https://doi.org/10.1175/JCLI-3299.1>

Soil Organic Carbon Sequestration Potential Maps in the Russian Cropland

V. A. Romanenkov^{1, 2}, J. L. Meshalkina^{1, *}, A. Yu. Gorbacheva¹,
A. N. Krenke³, I. K. Petrov⁴, O. M. Golozubov¹, and D. I. Rukhovich⁵

¹*Lomonosov Moscow State University, Moscow, 119991 Russia*

²*Pryanishnikov Research Institute of Agrochemistry, Moscow, 127434 Russia*

³*Institute of Geography, Russian Academy of Sciences, Moscow, 119017 Russia*

⁴*Analytical Forestry and Agriculture Center, Moscow, 115191 Russia*

⁵*Dokuchaev Soil Science Institute, Moscow, 119017 Russia*

*e-mail: jlmesh@list.ru

Adaptation of the farming systems that aim to store carbon in agricultural soils may be one of the ways to address global climate change. Current study aims were at estimating organic carbon sequestration in the Russian cropland at a soil depth of 0–30 cm by creating a series of maps. Data from global and national databases were used as the input data. Maps were generated in the framework of the FAO Global Soil Carbon Sequestration Map (GSOCseq) project according to the unified methodology using the RothC model to predict the rate of carbon sequestration in the period 2020–2040 under the business-as-usual scenario, as well as under sustainable soil management scenarios with a different increase in organic matter intake (+5, +10 and +20%) due to the use of carbon-saving practices. The total potential rate of sequestration by cropland of the Russian Federation in a layer of 0–30 cm under business-as-usual scenario can be estimated as 8.5 Mt/year, the estimate under sustainable soil management scenarios can reach up to 25.5 Mt/year. It is shown that the carbon sequestration by cropland of each zone of soil-ecological zoning (except for the light chestnut and brown semi-desert soils, where it around zero) and on a national scale are positive. The following regions have the greatest potential for sequestration: Altai Krai, Omsk Oblast, Novosibirsk Oblast, Krasnoyarsk Krai. In a number of subjects of the Russian Federation: the Krasnodar Territory, the Republic of Crimea, the Rostov Region, the Primorsky Territory, the Republic of Adygea and the Kaliningrad Region, measures should be taken to introduce the practice of sustainable management of soil resources.

Keywords: resource conservation technologies in agriculture, climate change, model RothC, agricultural lands, carbon balance, initiative “4 per 1000”