

ESTIMATION OF CARBON FLUXES IN AGROLANDSCAPES OF CENTRAL
CHERNOZEM ZONE BY SIMULATION MODELLING

O.E. Sukhoveeva, D.V. Karelin

Institute of geography RAS, 29, Staromonetnyi, 109017, Moscow, Russia

olgasukhoveeva@gmail.com

Citation: Sukhoveeva O.E., Karelin D.V., 2022. Estimation of carbon fluxes in agrolandscapes of Central Chernozem zone by simulation modelling // Environmental dynamics and global climate change. V. 13. N. 3. P. 156-170.

DOI: [10.18822/edgcc112022](https://doi.org/10.18822/edgcc112022)

Две имитационные модели углеродного цикла в пахотных почвах – DNDC и RothC – верифицированы по данным длительного мониторинга дыхания почвы на Курской биосферной станции. Они применены для воспроизведения динамики органического углерода в почве, ее дыхания и чистого экосистемного обмена в агроландшафтах Курской области за 1990-2021 гг. По результатам модельных экспериментов получено, что пахотные черноземы теряют 241-423 кг С га⁻¹ год⁻¹ органического углерода, их дыхание в зависимости от возделываемой культуры варьирует от 3386 до 8434 кг С га⁻¹ год⁻¹, кроме того агроэкосистемы способны поглотить 487-1312 кг С га⁻¹ год⁻¹ за счет накопления в фитомассе. Результаты RothC обусловлены климатическими факторами, преимущественно температурой, тогда как выходные данные DNDC отличаются видоспецифичностью для каждой культуры.

Ключевые слова: диоксид углерода, имитационное моделирование, нетто-баланс углерода, почвенный органический углерод, типичные черноземы

Keywords: carbon dioxide, simulation modelling, net carbon balance, soil organic carbon, Haplic Chernozems

Introduction

Simulation modelling is an important approach to estimating carbon fluxes in ecosystems. It allows reproducing them in the past and in the future under various combinations of environmental conditions, as well as considering soil types, vegetation cover and land use features, compensating for gaps in data series if they are unobtainable by way of measurements, and performing modelling experiments to help finding out how system will respond to changes in external conditions and which factors effect mainly the resulting indicator. The simulation approach is more interesting for croplands, which are unstable, subsidized ecosystems managed by man, where anthropogenic factors, different in strength and direction, act along with natural ones.

The purpose of the work was to assess the dynamics of carbon fluxes in various agricultural ecosystems of the Central Chernozem region over the past three decades. This required to verify carbon simulation models based on available field data, reproduce the values of CO₂ emissions and losses of soil organic carbon (SOC), net ecosystem exchange (NEE), as well as extrapolate the results obtained on a regional scale based on those data.

Materials and methods

The field base for the study was Kursk Biosphere Station. It carries out continuous year-round monitoring of CO₂ emissions from soil in natural and agricultural ecosystems. The measurements were carried out by a closed chamber method using portable infrared gas analyzers. The data accumulated from 2017 to 2021 became the data base for the verification of carbon simulation models.

To calculate the dynamics of carbon fluxes in agrocenoses, two simulation models widely used in the world, parametrized and verified for the European part of Russia were used: DNDC (DeNitrification-DeComposition, version 9.5) and RothC (Rothamsted Long Term Field Experiment Carbon Model, version 26.3).

As for the principles of preparing input information for the models and their settings for the conditions of the chernozem area of Russia, we described them earlier in detail.

To assess the accuracy of simulation, we used three criteria: the Nash-Sutcliffe model efficiency coefficient, the Theil inequality coefficient and the Pearson correlation coefficient.

The Rosstat data on crop yields in Kursk region for the respective time period were used as input data. Agrotechnological techniques were described according to the average recommended dates and timing of their

implementation as specified in the typical, traditional agrotechnologies. The daily air temperatures and precipitation were taken from the database of the Hydrometeorological Information International Data Center of the All-Russian Research Institute. The output data included soil respiration, dynamics of SOC, as well as NEE for DNDC. Their unit values were extrapolated to the territory of the region to obtain final estimates of the carbon balance in the soil and agricultural ecosystems on the scale of Kursk region.

Results

The DNDC model has been most successfully verified for cereals (corn, barley and winter wheat). For other crops (soybean, potato, sunflower), the simulation data almost exactly coincided with the measurement results, but there was an error in reproducing soil respiration for one of the years. The probable reason for that is the special conditions formed in the agrocenoses of these crops under the effect of mesorelief and microclimate, which cannot be considered and reproduced by way of modelling. The RothC verification demonstrates its high efficiency when applied for assessing soil respiration under all crops except for barley.

Both simulation models were used to reproduce carbon fluxes in the agricultural ecosystems of Kursk region from 1990 to 2021. Figure 3 shows that the dynamics of CO₂ emissions from soil and SOC have their own character for each crop in accordance with the DNDC output data. The maxima and minima are observed in different years and the increases and decreases do not coincide. Whereas the RothC model shows a clear temperature dependence of the results, when their values change synchronously from year to year (Fig. 4). The dynamics of soil respiration and SOC have the opposite direction (in years with intensive soil respiration, the carbon storage in soil decrease, and in cold years, when mineralization is not so intense, it increases).

For all crops, the RothC model predicts the loss of SOC in the amount of 294-414 kg C ha⁻¹ year⁻¹, whereas according to DNDC data, its accumulation during winter wheat cultivation (270 kg C ha⁻¹ year⁻¹) is also possible along with its losses under other crops (190-423 kg C ha⁻¹ year⁻¹). The estimates of soil respiration under crops for DNDC (3.4-8.4 tons C ha⁻¹ year⁻¹) are much wider than for RothC (4.9-5.5 tons C ha⁻¹ year⁻¹).

The DNDC output data include NEE, or carbon balance in an ecosystem. All agrocenoses act as CO₂ absorbers in the amount of at least 0.5 tons C ha⁻¹ year⁻¹ during the vegetation period, i.e. during the period, when the crops are in the fields, agrocenoses can be considered as carbon sinks. The agrocenoses of soybeans, corn and barley are the most intensive sinks, amounting to more than 1.1 tons C ha⁻¹ year⁻¹.

With a wide spread of winter wheat in Kursk region, it is possible to preserve 113.2 thousand tons C year⁻¹ in soil according to DNDC estimates. The cultivation of barley on large areas contributes to the loss of carbon in the amount of 79.9 thousand tons C year⁻¹. The total loss of carbon from soil under other crops does not exceed 30 thousand tons C year⁻¹. The RothC model predicts negative dynamics for SOC, which will be higher for widely cultivated crops: 123.1 thousand tons C year⁻¹ for winter wheat and 105.9 thousand tons C year⁻¹ for barley.

Despite the loss of SOC from the soil, the agrocenoses can act as carbon sinks during the vegetation season due to its accumulation in the growing phytomass. According to DNDC, NEE values show that it is possible to remove 393.4 thousand tons C year⁻¹ in winter wheat agrocenoses and 348.6 thousand tons year⁻¹ in barley ones from the atmosphere considering the crop acreages. All crops in the total area of arable land of Kursk region are able to sink 1062.6 thousand tons C year⁻¹ from the atmosphere.

Discussion

Both models used are climate-determined, where temperature is a key factor in the formation of carbon fluxes in ecosystems. When making a long-term simulation, this becomes particularly important, since Kursk region lies in the zone where an intensive increase of the air temperature has been observed over the past two decades.

Evidently, if the input data is identical, the difference in the output results will be due to the mathematical apparatus of each of the models. The total number of variables and the dependencies established between them have an important role as well.

Our numerical values of SOC losses and CO₂ emissions from the soil under various crops obtained are comparable with the data of other authors.

The average negative values of NEE according to the results of simulation using DNDC show that the gross primary production of the agricultural ecosystem exceeds significantly the ecosystem respiration, which is associated with high productivity of cultivated plants. But from the simulation results shown in Figure 3, it can be seen that in some years NEE has positive values, i.e. agricultural ecosystems can become a carbon source under certain weather conditions.

ВВЕДЕНИЕ

В науках о Земле, наряду с мониторингом, широкое распространение получило моделирование. Согласно определению МГЭИК [2014], модели представляют собой структурированные имитации характеристик и механизмов системы, позволяющие воспроизводить ее появление или функционирование. Математические модели сводят воедино многие переменные и связи (часто в

виде компьютерного кода) для имитации функционирования и показателей эффективности систем при разных параметрах и вводимых ресурсах.

В частности, моделирование является важнейшим подходом к оценке потоков углерода в экосистемах. Оно позволяет воспроизвести их в прошлом и будущем при различных сочетаниях условий окружающей среды, в том числе учесть типы почвы, растительного покрова и особенности землепользования, компенсировать пробелы в рядах данных при невозможности их получения путем измерений, а также провести модельные эксперименты, помогающие выяснить, как система отреагирует на изменение внешних условий и от каких факторов преимущественно зависит результирующий показатель. Несмотря на активное развитие имитационного моделирования в науках о Земле, оно встречается с серьезными трудностями, которые в случае описания потоков углерода обусловлены тем, что методы их оценки в полевых условиях крайне неоднородны, и, отчасти, поэтому до сих пор ощущается существенная нехватка экспериментальных данных для построения уравнений [Чертов, Надпорожская, 2016].

Тем более интересен имитационный подход для агроландшафтов – неустойчивых, дотируемых экосистем, управляемых человеком, где наряду с природными факторами действуют антропогенные, различные по силе и направленности [Karelin, Sukhoveeva, 2022]. Сегодня моделирование в географических науках стремительно развивается. Так, с его помощью был рассчитан углеродный баланс планеты, в том числе установлена интенсивность эмиссии CO_2 в результате землепользования, которая в 2011–2020 гг. составила $3,8 \pm 0,6 \text{ Гт С год}^{-1}$, или $1,1 \pm 0,7 \text{ Гт С год}^{-1}$ с учетом его удаления на управляемых землях [Friedlingstein et al., 2022]. Если в 2018 г. на сайте Международного консорциума по почвенному моделированию, International Soil Modeling Consortium (ISMC), было представлено 33 модели, которые наиболее оптимально отражают почвенные процессы, то сейчас их зарегистрировано уже 42 [<https://soil-modeling.org/resources-links/model-portal>].

Цель работы состояла в том, чтобы оценить динамику потоков углерода в различных агроэкосистемах Центрального Черноземья за последние три десятилетия. Для этого требовалось верифицировать имитационные углеродные модели по имеющимся полевым данным, воспроизвести с их помощью значения эмиссии CO_2 и потерь органического углерода из почвы, нетто-экосистемного обмена, а также экстраполировать полученные результаты в масштабе области.

Полевой базой исследования послужила Курская биосферная станция, на которой с 2017 г. ведется постоянный мониторинг дыхания почвы в различных типах экосистем. Накопленные за эти годы данные стали основой для оценки потоков углерода в агроценозах Центрального Черноземья – ключевого сельскохозяйственного района России. В качестве объектов выступали агроценозы шести наиболее распространенных в регионе культур: озимая пшеница, ячмень, соя, кукуруза, подсолнечник, картофель.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Курская биосферная станция

Курская биосферная станция Института географии РАН расположена в селе Панино, Медвенского района, Курской области. Это лесостепной географический стационар, лежащий в 20 км к югу от Курска вблизи Центрально-Черноземного биосферного заповедника. Станция была основана и оборудована как общегеографическая в 1958-1961 гг. в качестве дополнительного элемента к экспедиционным исследованиям в Центрально-Черноземном районе, что позволяет проследить и оценить влияние различных видов сельскохозяйственной деятельности на геосистемы лесостепной зоны за длительный период времени [Петрова, 2008].

В 2017 г. нами на станции заложены площадки мониторинга в природных и аграрных экосистемах, на которых на протяжении уже шести лет ведутся непрерывные круглогодичные измерения эмиссии CO_2 из почвы. Они проводятся закрытым камерным методом в 10-кратной повторности в цилиндрических ПВХ-камерах до 20 см высотой и площадью 100 см^2 в течении 3 мин. с помощью портативных инфракрасных газоанализаторов AZ 7752 (AZ instruments, Тайвань) со средней периодичностью 1 раз в 10-15 дней. Параллельно измеряется температура воздуха, температура почвы на глубинах 5 и 10 см (Checkemp-1, HI 98509, Hanna instruments, США) и объемная влажность почвы (SM 150 Kit, Delta-T, Великобритания).

Накопленные за 2017-2021 гг. данные по дыханию почвы стали основой для верификации углеродных моделей. Опытные поля расположены на тяжелосуглинистых выщелоченных черноземах (Haplic Chernozem), характеристики которых были взяты из монографии Люри с соавт. [2010].

Имитационные углеродные модели

Для восстановления динамики потоков углерода в агроценозах применялись две широко используемые в мире, настроенные и верифицированные для европейской территории России имитационные модели:

- DNDC (DeNitrification-DeComposition, версия 9.5) – процессно-ориентированная модель циклов углерода и азота в почвах сельскохозяйственного назначения [Li et al., 1992];
- RothC (Rothamsted Long Term Field Experiment Carbon Model, версия 26.3) – модель круговорота органического углерода в верхних слоях автоморфных почв [Jenkinson et al., 1987].

Принципы подготовки входной информации для моделей и их настройки для условий черноземной зоны России подробно описаны нами ранее: для DNDC [Суховеева, Карелин, 2019]; для RothC [Суховеева, 2020].

Верификация

Для оценки точности моделирования использовались три критерия, сопоставляющих измеренные и смоделированные значения эмиссии CO_2 из почвы:

- Коэффициент эффективности моделирования Нэша-Сатклиффа (NS). Он представляет собой статистическую меру, отражающую долю дисперсии наблюдаемых величин и обоснованную рассчитанными значениями [Сазонова и Китаев, 2013]. Значения коэффициента лежат в диапазоне $(-\infty; 1]$; если $NS < 0$, это говорит о несостоятельности модели. Она эффективна при $NS > 0$; и чем значение ближе к 1, тем точнее воспроизводится процесс, особенно успешными считаются случаи, когда $NS > 0,5$.

- Коэффициент несоответствия Тейла (T). Он показывает степень схожести временных рядов и существенно зависит от их дисперсии [Пискунов, 2012]. Значения коэффициента лежат в диапазоне $[0; 1]$, и чем ближе коэффициент к нулю, тем точнее моделирование. При исследовании природных процессов порог его значимости, когда смоделированные ряды признаются идентичными измеренным, составляет $T \leq 0,3$.

- Коэффициент корреляции Пирсона (r_p). Значимыми считались корреляции при условии $r_p > 0,30$, $p < 0,05$.

Поскольку DNDC рассчитывает потоки углерода с суточным шагом, ее верификация проводилась отдельно для каждого года, когда культура возделывалась, а также для всего массива данных за весь период ее нахождения на полях. Для некоторых культур, продолжительность рядов данных для которых в 2019 г. была недостаточной, этот год был объединен с предыдущим (озимая пшеница, картофель). Шаг RothC составляет месяц, что значительно снижает объем имеющихся значений (сокращает размер рядов данных для проверки), поэтому ее верификация по каждой культуре проводилась для всего ряда данных в совокупности, т.е. для каждой культуры суммарно за весь период наблюдений.

Расчет потоков углерода

Входной информацией послужили сведения Росстата об урожайности культур в области за соответствующий период времени [<https://fedstat.ru/indicator/31533>]. На основании собранной информации о технологиях возделывания сельскохозяйственных культур были подготовлены входные данные для имитационных моделей углеродного цикла. Агротехнологические мероприятия описывались в соответствии со средними рекомендуемыми датами и сроками их проведения, указанными в типовых технологических картах [Карпов, 2000].

Суточные температуры воздуха и количество осадков были взяты из базы данных ВНИИ ГМИ – МЦД [<http://aisori-m.meteo.ru/waisori/select.xhtml>] по метеостанции г. Курск (№ 34009).

Пример одного из модельных экспериментов в форме исходных файлов с входными данными для обеих моделей представлен в виде дополнительных материалов по ссылке [<https://edgcejournal.org/EDGCC/article/view/112022>].

Выходные данные включали в себя помимо дыхания почвы еще и динамику органического углерода ($C_{\text{орг}}$) в почве для обеих моделей, а также, дополнительно для DNDC, нетто-баланс углерода в экосистеме. На основе индуктивного подхода, мы считаем допустимым использовать расчетные значения смежных потоков углерода при том, что доказана корректность одного из них. Удельные значения были экстраполированы на площадь субъекта для получения итоговых оценок баланса углерода в почве и агроэкосистемах в масштабе Курской области. Отсутствие в базе данных Росстата

непрерывного ряда данных по посевным площадям позволяет использовать лишь средние значения за 2006 и 2016 г.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Верификация

Модель DNDC наиболее успешно прошла верификацию для зерновых культур (Табл. П1, Рис. П1): для кукурузы, ячменя и озимой пшеницы моделирование отличалось высокими показателями эффективности и сильными корреляциями между измеренными и расчетными величинами.

Для других культур данные моделирования также практически безошибочно совпадали с результатами измерений, но наблюдалась погрешность при воспроизведении дыхания почвы в один из годов: например, у сои в 2018 г., у подсолнечника в 2020 г., из-за чего несколько снижались показатели эффективности для всего ряда данных. Вероятная причина этого – особые условия, формирующиеся в агроценозах этих культур под воздействием мезорельефа и микроклимата, которые не могут быть учтены и воспроизведены с помощью моделирования. Результаты верификации для картофеля противоречивы: полевые данные совпадают с расчетными по критерию Т, но не проходят проверку по коэффициенту NS.

Верификация RothC проводилась на основе полного ряда данных измерений для каждой культуры в совокупности (Рис. П2). Полученные значения критериев позволяют судить о высокой эффективности ее применения для оценки дыхания почвы под всеми культурами, кроме ячменя.

В целом можно утверждать, что две выбранные модели успешно дополняют друг друга и могут применяться совместно для оценки потоков углерода в агроэкосистемах.

Длинные ряды

В дальнейшем обе имитационные модели были использованы для воспроизведения потоков углерода в агроэкосистемах Курской области за 1990-2021 гг.

На Рисунке П3 заметно, что в выходных данных DNDC динамика эмиссии CO_2 из почвы и запасов $\text{C}_{\text{орг}}$ в ней имеет свой характер для каждой культуры – максимумы и минимумы наблюдаются в разные годы, повышения и понижения не совпадают.

Тогда как в RothC из-за малого количества переменных наблюдается явная температурная обусловленность результатов, когда из года в год их значения меняются синхронно и с небольшой разницей (Рис. П4). Динамика дыхания почвы, рассчитанная с помощью RothC, согласуется с ходом температуры воздуха. Так, отмечается резкий рост этого показателя в жаркий и засушливый 2010 г. и спад – в прохладном 1993 г. Динамика $\text{C}_{\text{орг}}$ в почве противоположная. В годы с интенсивным дыханием почвы его запасы уменьшаются, а в прохладные, когда минерализация идет не так интенсивно, запасы увеличиваются за счет поступления фитомассы.

Расчет потоков углерода

Представляет интерес сравнить однородные результаты, полученные на основе двух примененных моделей, усреднив результаты, полученные при воспроизведении многолетних рядов.

Таблица П2 показывает, что модель RothC дает более высокие оценки потерь $\text{C}_{\text{орг}}$ из почвы, чем DNDC. Кроме того, первая модель для всех культур прогнозирует потерю органического углерода из почвы величиной $294\text{--}414 \text{ кг С га}^{-1} \text{ год}^{-1}$, тогда как по данным DNDC возможны не только его потери ($190\text{--}423 \text{ кг С га}^{-1} \text{ год}^{-1}$), но и накопление при возделывании озимой пшеницы ($270 \text{ кг С га}^{-1} \text{ год}^{-1}$).

Оценки дыхания почвы под культурами в разных моделях различаются. Диапазон выходных данных для DNDC ($3,4\text{--}8,4 \text{ т С га}^{-1} \text{ год}^{-1}$) гораздо шире, чем для RothC ($4,9\text{--}5,5 \text{ т С га}^{-1} \text{ год}^{-1}$). А при сравнении результатов, полученных для каждой отдельной культуры, можно заметить, что численные результаты расчетов по первой модели выше.

Выходные данные DNDC намного более разнообразны и включают такой важный показатель как нетто-экосистемный обмен, или баланс углерода в экосистеме. Он формируется как разница между валовой первичной продукцией и эмиссией в результате дыхания экосистемы. По результатам расчетов DNDC, все агроценозы в период произрастания культур выступают поглотителями CO_2 в размере не менее $0,5 \text{ т С га}^{-1} \text{ год}^{-1}$, т.е. в период нахождения культур на полях их можно рассматривать как стоки углерода. Наиболее интенсивно идет поглощение в агроценозах сои, кукурузы и ячменя, составляя более $1,1 \text{ т С га}^{-1} \text{ год}^{-1}$.

Экстраполяция на площадь административного субъекта

Среди показателей потоков углерода наиболее важными с точки зрения эмиссии/поглощения является динамика $C_{орг}$ в почве и нетто-экосистемный обмен. Их удельные значения, полученные при моделировании, могут быть экстраполированы на площадь для оценки баланса углерода в почве и агроэкосистемах Курской области в целом.

По оценкам с помощью DNDC, почва под озимой пшеницей может накапливать углерод, что при широком распространении этой культуры на территории данной области позволяет сохранить 113,2 тыс. т С год⁻¹. Возделывание ячменя на больших площадях способствует потере углерода в размере 79,9 тыс. т С год⁻¹. Поскольку площади произрастания остальных культур в Курской области гораздо меньше, совокупные потери углерода для них не превышают 30 тыс. т С год⁻¹ (Табл. ПЗ). Модель RothC прогнозирует отрицательную динамику $C_{орг}$ под всеми культурами, которая в совокупности, очевидно, будет выше для широко возделываемых культур: 123,1 тыс. т С год⁻¹ для озимой пшеницы и 105,9 тыс. т С год⁻¹ для ячменя.

Несмотря на потерю $C_{орг}$ из почвы, агроценозы в течение вегетации могут выступать поглотителями углерода за счет накопления его в растущей фитомассе. Нетто-экосистемный обмен, по данным DNDC, с учетом посевных площадей позволяет изъять из атмосферы 393,4 тыс. т С год⁻¹ в агроценозах озимой пшеницы и 348,6 тыс. т С год⁻¹ в агроценозах ячменя. Все культуры в совокупности, на общей площади пашен в Курской области, составляющей около миллиона гектаров, способны поглотить более миллиона тонн углерода из атмосферы (1062,6 тыс. т С год⁻¹).

ОБСУЖДЕНИЕ

Рассматриваемые модели достаточно широко использовались в России. Так, DNDC применялась для оценки эмиссии N₂O из почвы, занятой овощными культурами [Balashov et al., 2010] и потока CO₂ из верховых болот [Kurbatova et al., 2009]. Ранее она была приложена нами к расчету динамики $C_{орг}$ и эмиссии CO₂ из почв Центрального Нечерноземья [Sukhovееva, Karelin, 2019]. Вторая модель, RothC, часто использовалась для опосредованных оценок скорости восстановления запасов $C_{орг}$ в залежных почвах [Heikkinen et al., 2014] и их потери на пашнях [Romanenkov, 2011; Smith et al., 2007].

Важно отметить, что обе модели относятся к климатообусловленным, где ключевым фактором формирования потоков углерода в экосистемах является температура. При моделировании за длительные промежутки времени это приобретает особую значимость, поскольку Курская область лежит в зоне, где за последние три десятилетия наблюдается интенсивное увеличение температуры воздуха. Наблюдаемый здесь тренд (+0.68°C/10 лет) превышает показатель для европейской части страны (+0.53°C/10 лет) [Суховеева и др., 2020].

Действительно, температура и влажность почвы признаются важнейшими факторами, от которых зависит дыхание почвы и скорость разложения органического вещества [Наумов, 2004; Moyano et al., 2013; Reichstein et al., 2005]. Причем их соотношение зависит от порогового значения влажности почвы: если наблюдаемое значение влажности превышает пороговое, то ключевым фактором выступает температура, если оно оказывается ниже – таковым фактором выступает влажность [Francioni et al., 2020]. Не менее важны характеристики почвы и растительного покрова [Курганова и др., 2011; Chen et al., 2014].

Очевидно, что при идентичности входных данных, разница выходных результатов будет обусловлена математическим аппаратом каждой из моделей. Анализ уравнений в них показывает, что именно коэффициенты при переменной температуры имеют наибольший вес. Важную роль также играет общее количество переменных и установленные между ними зависимости. В DNDC входных переменных более 100 и вклад температуры при расчетах снижается в пользу биологических особенностей культур [Gilhespy et al., 2014].

В нашей предыдущей работе мы обращали внимание на регионспецифичность выходных данных RothC и культуроспецифичность DNDC при воспроизведении ими динамики $C_{орг}$ в почве [Суховеева и др., 2020]. Этот же вывод подтверждается и при расчетах дыхания почвы. Ежегодные значения RothC для разных культур практически идентичны друг другу и синхронно меняются из года в год, тогда как результаты DNDC более дифференцированы по культурам, и различия между ними существенны.

Полученные нами численные значения потерь $C_{орг}$ из почвы под различными культурами в размере 294–414 кг С га⁻¹ год⁻¹ (RothC) и 241–423 кг С га⁻¹ год⁻¹ (DNDC) сопоставимы с данным других

авторов. В почвах Центрального Черноземья формируется отрицательный баланс гумуса, потери которого оцениваются в $0,7-0,9 \text{ т га}^{-1} \cdot \text{год}^{-1}$, что соответствует снижению содержания $C_{\text{орг}}$ в регионе на уровне $300-400 \text{ кг С га}^{-1} \cdot \text{год}^{-1}$ [Косолапов и др., 2015]. Исходя из массива данных по почвам Курской области [Семенов и др., 2018] и принимая среднюю плотность пахотного горизонта типичного чернозема за $1,2 \text{ г/см}^3$ [Люри и др., 2010], можно рассчитать, что в пахотных почвах содержится в 1,7-2,9 раз меньше активного органического вещества по сравнению с целинными: $1560-2592 \text{ кг га}^{-1}$ в зависимости от системы внесения удобрений по сравнению с 4464 кг га^{-1} на целине. Наиболее оптимальным решением этой проблемы, наряду с внесением удобрений, является оставление и последующее запахивание растительных остатков, а также возвращение побочной продукции [Суховаева, 2022].

Модельные значения также сходны с оценками потоков углерода, полученными для озимой пшеницы на близких к черноземам серых лесных почвах. Например, накопление $C_{\text{орг}}$ в размере от 270 (DNDC) до 294 (RothC) $\text{кг С га}^{-1} \cdot \text{год}^{-1}$ совпадает с полевыми данными в интервале от 163 до 278 $\text{кг С га}^{-1} \cdot \text{год}^{-1}$ в Московской области [Сапронов, 2008]. Расчетные результаты по эмиссии CO_2 из почвы под этой же культурой, от 5480 (RothC) до 8434 (DNDC) $\text{кг С га}^{-1} \cdot \text{год}^{-1}$, можно сравнить с полевыми оценками дыхания серой лесной почвы в Орловской области, $7420-8196 \text{ кг С га}^{-1} \cdot \text{год}^{-1}$ [Карелин и др., 2017].

Средние отрицательные значения нетто-баланса по результатам моделирования с помощью DNDC (Табл. П2) говорят о том, что валовая первичная продукция агроэкосистемы обычно существенно превышает экосистемное дыхание, что связано с высокой продуктивностью культурных растений. Но из результатов моделирования, приведенных на Рисунке П3, можно заметить, что для высокорослых культур с обильной фитомассой – кукурузы, подсолнечника, а также озимой пшеницы, в отдельные годы нетто-экосистемный обмен принимает положительные значения, т.е. агроэкосистемы могут становиться источником углерода при определенных погодных условиях.

Основной недостаток моделирования состоит в том, что используемые подходы к разработке системы уравнений, выбор констант и переменных, а также принципы учета и разделения потоков углерода в каждой модели во многом предопределяют получаемые выходные данные. Так, высокие значения дыхания почвы в модели DNDC обусловлены тем, что этот показатель является суммой микробного и корневого дыхания. Тогда как при расчете баланса $C_{\text{орг}}$ в почве алгоритм модели учитывает только потери в процессе микробного разложения органического вещества. Дыхание корней же входит в другой блок – экосистемного обмена [Gillespy et al., 2014]. В модели RothC эмиссия CO_2 складывается из разложения четырех пулов почвенного органического углерода: легко и трудно разлагаемого растительного материала, микробной биомассы и гумифицированного органического вещества [Jenkinson et al., 1987], но только последний из них отражается в качестве показателя динамики $C_{\text{орг}}$.

Также дискуссионным в контексте проведенного моделирования остается вопрос о пространственных рамках применяемой оценки нетто-экосистемного обмена. Проблема состоит в том, что в однолетних агроценозах, какими являются все моделируемые здесь культуры, биомасса растений ежегодно отчуждается с урожаем в виде основной и побочной продукции, а затем на следующий год цикл повторяется. С точки зрения круговорота в самой агроэкосистеме, эта часть безвозвратно теряется, и ее следует включить в категорию экспорта или потерь. Если азот и фосфор, потерянные с биомассой, могут восполняться посредством внесения минеральных удобрений, то потери углерода на черноземах обычно не возмещаются органическими удобрениями [Косолапов и др., 2015], что, как видно из результатов моделирования, отражается в потерях углерода из почвы. Поэтому, то, что DNDC рассматривает ежегодно созданную фитомассу, как приходящую часть нетто-баланса экосистемы, может считаться спорным концептуальным моментом и требует зрячего подхода при решении конкретных задач с использованием этой модели, поскольку она дает возможность постфактум количественно оценить экспорт фитомассы.

ВЫВОДЫ

1. Имитационные углеродные модели DNDC и RothC показали себя в качестве адекватных инструментов оценки потоков углерода в агроландшафтах. С их помощью были рассчитаны дыхание почвы, изменение содержания в ней органического углерода и нетто-экосистемный обмен в агроценозах озимой пшеницы, ячменя, кукурузы, сои, подсолнечника и картофеля в Курской области за длительный период (1990-2021 гг.).

2. Согласно результатам модели DNDC, агроландшафты Центральной Черноземной зоны, вне зависимости от выращиваемых культур, выступали за этот период в качестве в разной степени выраженных экосистемных нетто-поглотителей углерода. Тем не менее, для большинства культур при этом наблюдались потери углерода из почвы. Исключение составляла только озимая пшеница, под которой возможно его накопление в почве. Это означает, что основным резервуаром стока для этих агроэкосистем является фитомасса, большая часть которой отчуждается с урожаем.

3. Данные, полученные с помощью модели RothC, подтверждают потерю органического углерода из пахотных черноземов за исследуемый период, характеризующийся прогрессирующим потеплением.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена по теме ГЗ Института географии РАН № FMWS-2022-0003.

ПРИЛОЖЕНИЕ

Таблица П1. Верификация моделей по данным измерений дыхания почвы на Курской биосферной станции за 2017-2021 гг.

Культура	Модель	Год	Объем выбор ки	Коэффициент Нэша- Сатклиффа, NS	Коэффициент Тейла, T	Коэффициент корреляции	
						r_p	p
Кукуруза	DNDC	2018	16	0,60	0,16	0,77	<0,01
		2021	13	0,52	0,21	0,78	<0,01
		За все годы	29	0,56	0,18	0,76	<0,01
	RothC	За все годы	15	0,14	0,22	0,85	<0,01
Ячмень	DNDC	2017	17	0,02	0,20	0,53	0,03
		2020	17	0,38	0,23	0,63	0,01
		2021	13	0,09	0,29	0,61	0,03
		За все годы	47	0,22	0,24	0,53	<0,01
	RothC	За все годы	25	-0,02	0,33	0,50	0,01
Пшеница озимая	DNDC	2017	17	0,23	0,27	0,53	0,03
		2018+2019	19	0,01	0,29	0,32	0,19
		За все годы	36	0,15	0,28	0,46	<0,01
	RothC	За все годы	15	0,07	0,25	0,51	0,05
Соя	DNDC	2018	16	-1,52	0,45	0,45	0,08
		2020	17	0,48	0,24	0,76	<0,01
		2021	13	0,29	0,27	0,75	<0,01
		За все годы	46	-0,08	0,37	0,58	<0,01
	RothC	За все годы	28	0,18	0,28	0,62	<0,01
Подсолнеч ник	DNDC	2017	16	0,26	0,26	0,66	<0,01
		2020	17	-0,43	0,35	0,33	0,20
		2021	13	0,15	0,31	0,63	0,02
		За все годы	46	0,15	0,29	0,57	<0,01
	RothC	За все годы	29	0,27	0,23	0,68	<0,01
Картофель	DNDC	2017	16	-0,02	0,26	0,30	0,26
		2018+2019	21	-0,11	0,23	0,49	0,03
		За все годы	37	0,14	0,24	0,41	0,01
	RothC	За все годы	18	0,321	0,189	0,66	<0,01

Примечание. Серым отмечены ячейки, коэффициенты в которых говорят о несовпадении полевых и модельных значений. В остальных ячейках коэффициенты подтверждают соответствие между расчетными и измеренными значениями.

Таблица П2. Средние значения потоков углерода за 1990-2021 гг. по данным моделирования, кг С га⁻¹ год⁻¹

Модель	RothC		DNDC		
	Баланс С _{орг} в почве	Дыхание почвы	Баланс С _{орг} в почве	Дыхание почвы	Нетто-экосистемный обмен
Кукуруза	-306 ± 51	5540 ± 454	-241 ± 494	4536 ± 385	-1312 ± 995
Ячмень	-338 ± 56	5243 ± 417	-255 ± 312	6897 ± 255	-1113 ± 498
Картофель	-412 ± 56	4923 ± 419	-190 ± 494	6758 ± 343	-990 ± 695
Соя	-414 ± 56	4919 ± 418	-423 ± 236	3386 ± 233	-1861 ± 340
Подсолнечник	-346 ± 52	4946 ± 407	-241 ± 671	5448 ± 577	-487 ± 928
Пшеница озимая	-294 ± 53	5480 ± 420	270 ± 478	8434 ± 719	-939 ± 721

Примечание. Даны средние значения и стандартные отклонения. Положительные значения почвенного баланса означают накопление углерода, отрицательные – его потерю. Для нетто-обмена, наоборот, отрицательные значения означают сток углерода в экосистему.

Таблица П3. Экстраполяция потоков углерода по отдельным культурам на Курскую область

Показатели Культуры	Средняя посевная площадь, тыс. га (по данным Росстата)	Потоки углерода, тыс. т С год ⁻¹		
		Баланс С _{орг} в почве	Баланс С _{орг} в почве	Нетто-экосистемный обмен
		RothC	DNDC	DNDC
Кукуруза	82,4	-25,2	-19,9	-108,1
Ячмень	313,1	-105,9	-79,9	-348,6
Картофель	47,2	-19,5	-9,0	-46,7
Соя	69,8	-28,9	-29,5	-129,8
Подсолнечник	73,9	-25,6	-17,8	-36,0
Пшеница озимая	418,8	-123,1	113,2	-393,4
Всего	1005,2	-328,1	-42,8	-1062,6

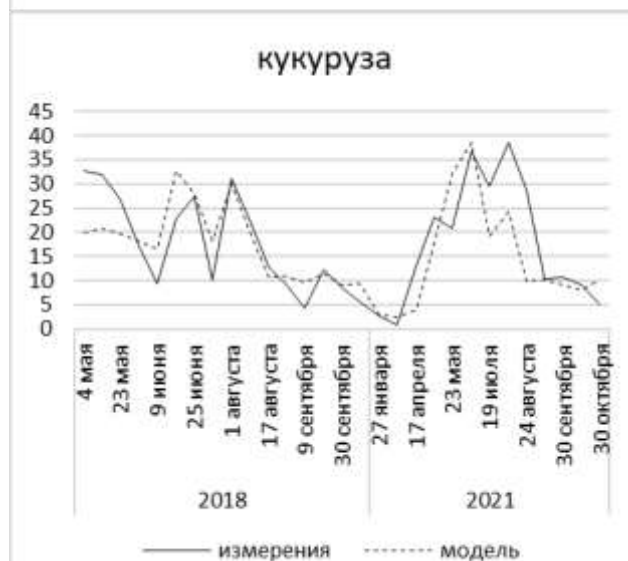
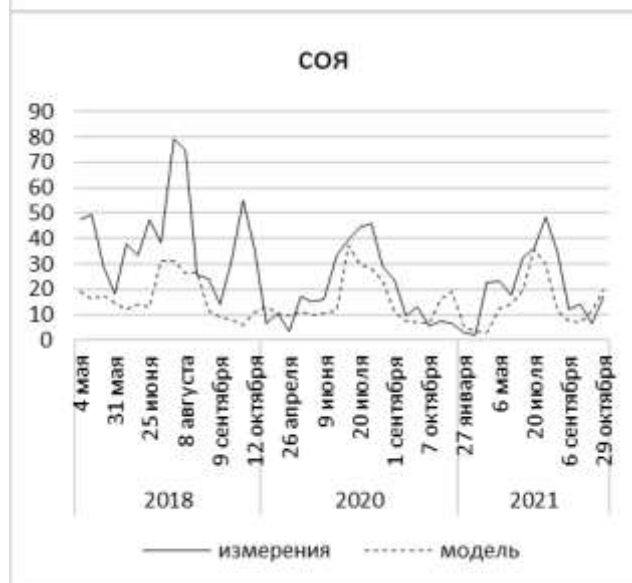
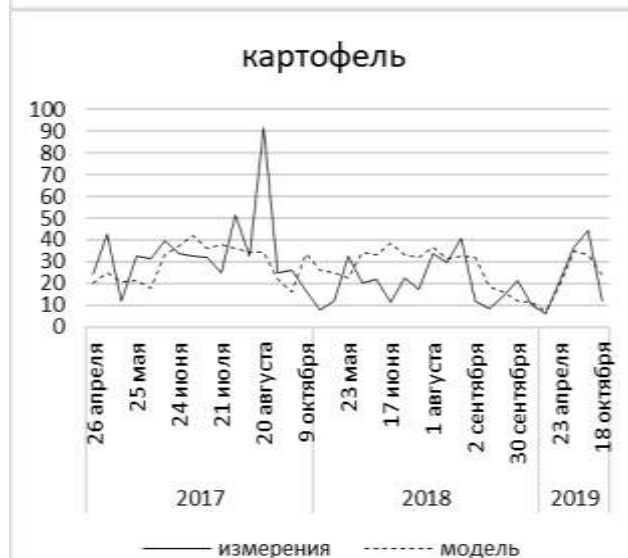
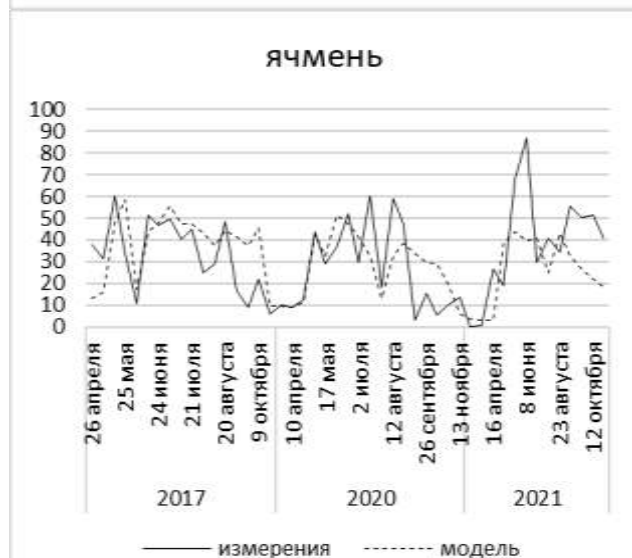
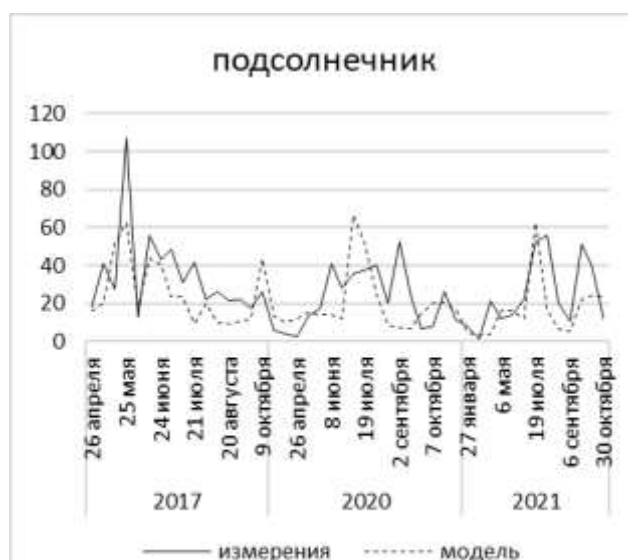
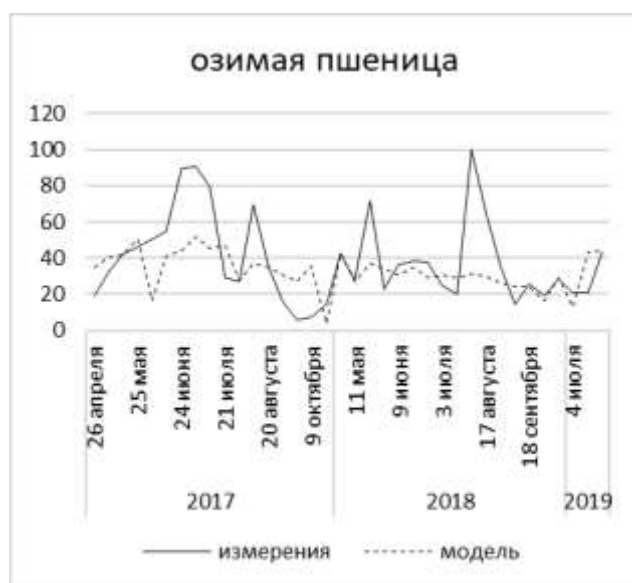


Рисунок III. Верификация модели DNDC на основании данных измерений дыхания почвы на Курской биосферной станции ($\text{кг С га}^{-1} \text{сут}^{-1}$).

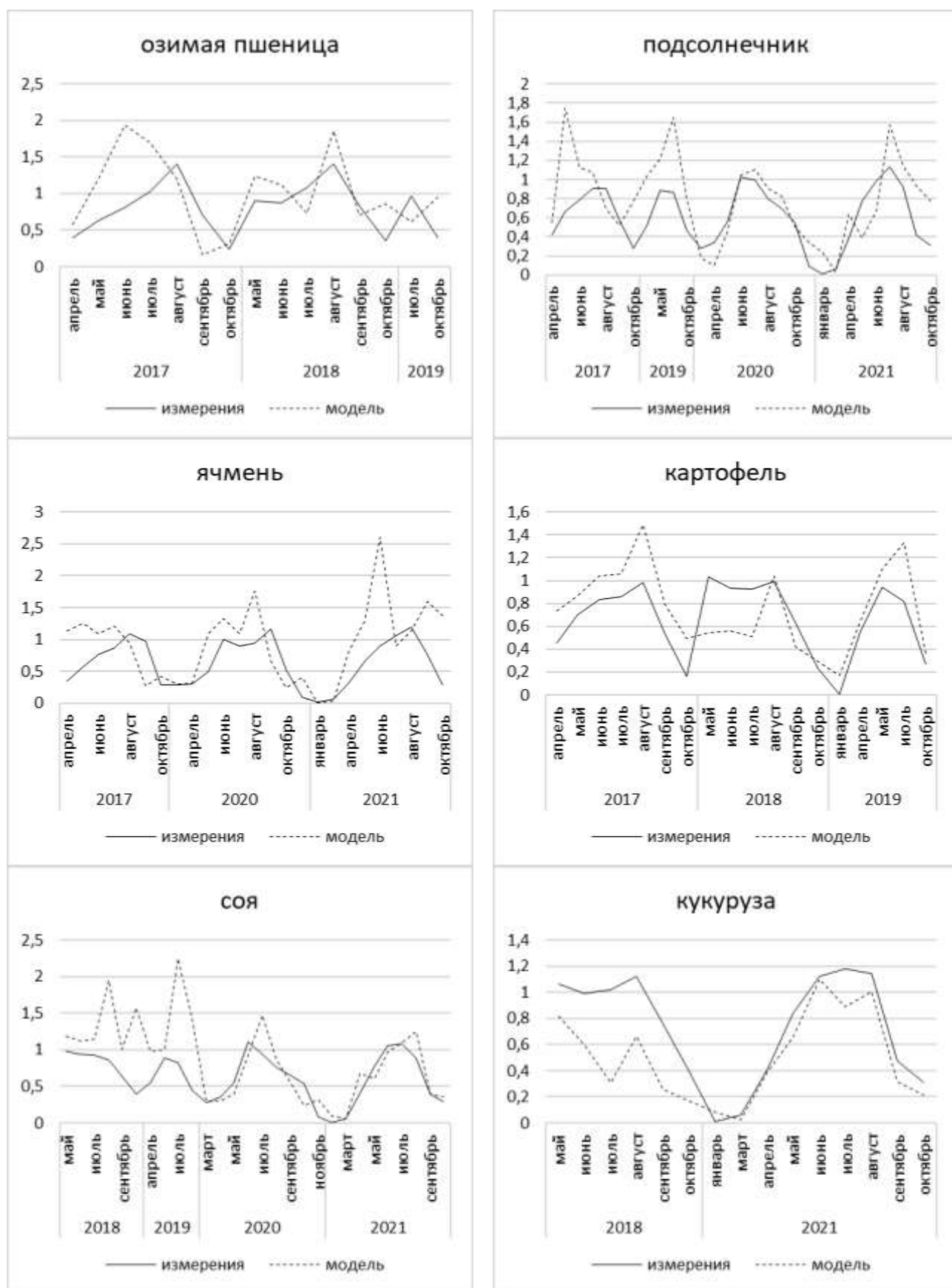
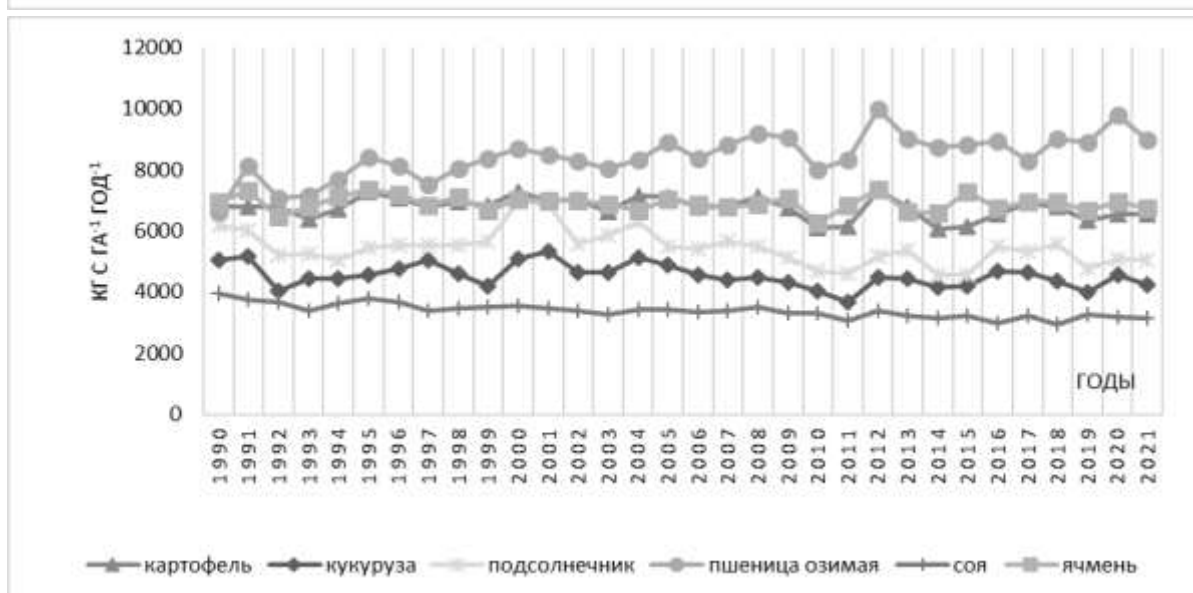


Рисунок П2. Верификация модели RothC на основании данных измерений дыхания почвы на Курской биосферной станции ($\text{т С га}^{-1} \text{ мес}^{-1}$).



А

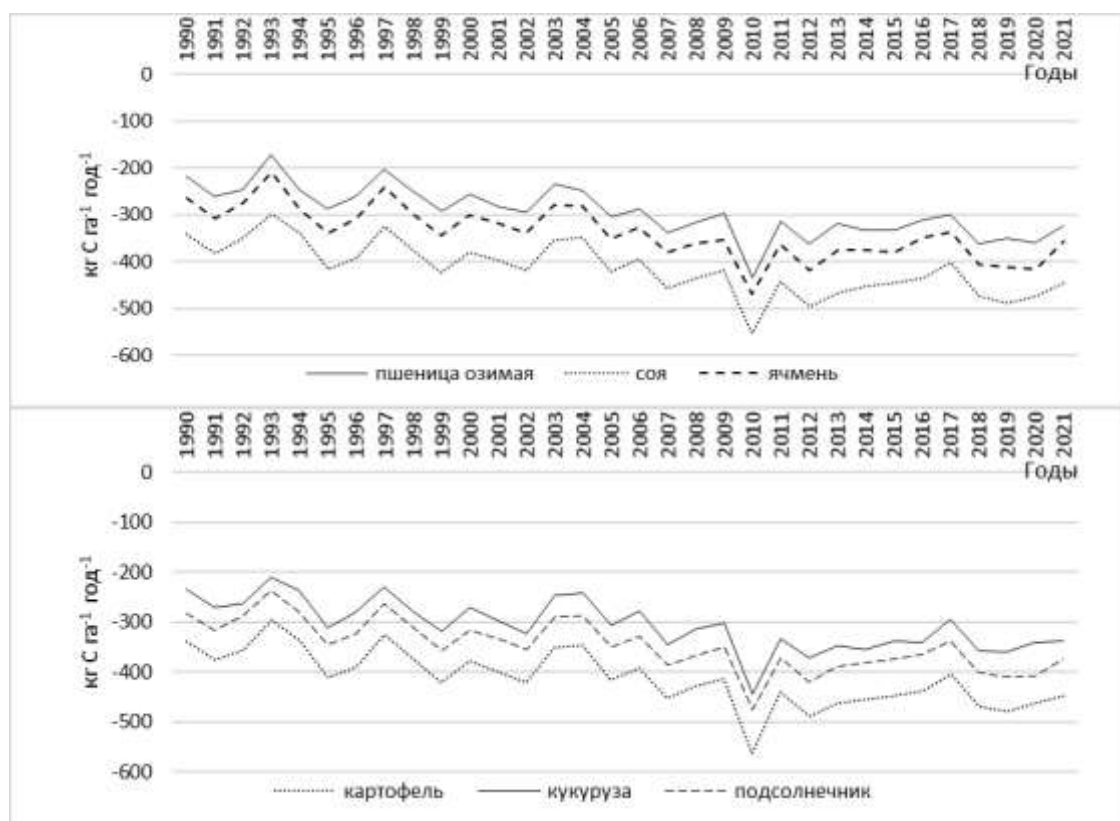


Б

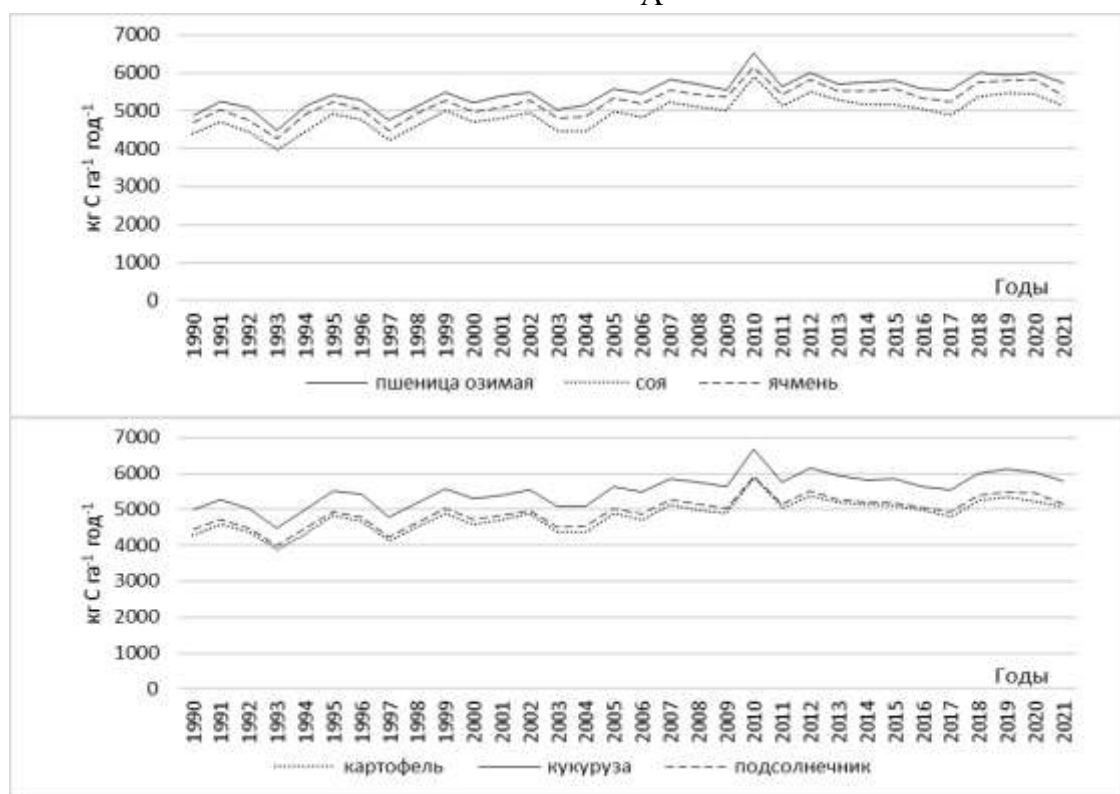


В

Рисунок ПЗ. Воспроизведение потоков углерода в агроэкосистемах Курской области за 1990-2021 гг. с помощью модели DNDC: А – баланс органического углерода в почве, Б – дыхание почвы, В – нетто-экосистемный обмен.



А



Б

Рисунок П4. Воспроизведение потоков углерода в Курской области за 1990-2021 гг. с помощью модели RothC: А – баланс органического углерода в почве, Б – дыхание почвы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Карелин Д.В., Горячкин С.В., Кудиков А.В., Лопес де Гереню В.О., Лунин В.Н., Долгих А.В., Люри Д.И. 2017. Изменение запасов углерода и эмиссии CO₂ в ходе постагрогенной сукцессии растительности на серых почвах в Европейской части России // Почвоведение. № 5. С. 580-594. [Karelin D.V., Goryachkin S.V., Kudikov A.V., Lopes de Gerenyu V.O., Lunin V.N., Dolgikh A.V., Lyuri D.I. 2017. Izmenenie zapasov ugleroda i emissii SO₂ v khode postagrogennoi suksessii rastitel'nosti na serykh pochvakh v Evropeiskoi chasti Rossii // Pochvovedenie. N. 5. P. 580-594.]
- Карпов А.М. 2000. Техническое обеспечение технологий в растениеводстве. Саранск: Изд-во Мордов. ун-та. 200 с. [Karpov A.M. 2000. Tekhnicheskoe obespechenie tekhnologii v rastenievodstve. Saransk: Izd-vo Mordov. un-ta. 200 p.]
- Косолапов В.М., Трофимов И.А., Трофимова Л.С., Яковлева Е.П. 2015. Агроландшафты Центрального Черноземья. Районирование и управление. М.: Наука. 198 с. [Kosolapov V.M., Trofimov I.A., Trofimova L.S., Yakovleva E.P. 2015. Agrolandshafty Tsentral'nogo Chernozem'ya. Raionirovanie i upravlenie. M.: Nauka. 198 p.]
- Курганова И.Н., Лопес де Гереню В.О., Мякшина Т.Н., Сапронов Д.В., Кудеяров В.Н. 2011. Эмиссия CO₂ из почв различных экосистем южно-таежной зоны: анализ данных непрерывных 12-летних круглогодичных наблюдений // Доклады Академии наук. Т. 436. № 6. С. 843-846. [Kurganova I.N., Lopes de Gerenyu V.O., Myakshina T.N., Sapronov D.V., Kudeyarov V.N. 2011. Emissiya SO₂ iz pochv razlichnykh ekosistem yuzhno-taezhnoi zony: analiz dannykh nepreryvnykh 12-letnikh kruglogodichnykh nablyudenii // Doklady Akademii nauk. V. 436. N. 6. P. 843-846.]
- Люри Д.И., Горячкин С.В., Караваева Н.А., Денисенко Е.А., Нефедова Т.Г. 2010. Динамика сельскохозяйственных земель России в XX веке и постагрогенное восстановление растительности и почв. М.: ГЕОС, 416 с. [Lyuri D.I., Goryachkin S.V., Karavaeva N.A., Denisenko E.A., Nefedova T.G. 2010. Dinamika sel'skokhozyaystvennykh zemel' Rossii v KhKh veke i postagrogennoe vosstanovlenie rastitel'nosti i pochv. M.: GEOS, 416 p.]
- МГЭИК, 2014: Изменение климата, 2014 г.: Смягчение воздействий на изменение климата. Вклад Рабочей группы III в Пятый оценочный доклад Межправительственной группы экспертов по изменению климата». Кембридж: Университи Пресс, Соединенное Королевство, Нью-Йорк, США., 2014. 1435 с. [MGEIK, 2014: Izmenenie klimata, 2014 g.: Smyagchenie vozddeystvii na izmenenie klimata. Vklad Rabochei gruppy III v Pyatyi otsenochnyi doklad Mezhpavitel'stvennoi gruppy ekspertov po izmeneniyu klimata». Kembridzh: Yuniversiti Press, Soedinennoe Korolevstvo, N'yu- Iork, SShA., 2014. 1435 p.]
- Наумов А.В. 2004. Дыхание почвы: составляющие, экологические функции, географические закономерности: автореф. ... д-ра биол. наук. Томск. [Naumov A.V. 2004. Dykhanie pochvy: sostavlyayushchie, ekologicheskie funktsii, geograficheskie zakonomernosti: abstract of the dissertation for the degree of Doctor of Biological Sciences. Tomsk.]
- Петрова И.Ф. 2008. Концепция геоинформационно-поисковой системы географического стационара (на примере Курской биосферной станции ИГ РАН) // Известия РАН. Серия географическая. № 1. С. 125-130. [Petrova I.F. 2008. Kontseptsiya geoinformatsionno-poiskovoi sistemy geograficheskogo statsionara (na primere Kurskoi biosfernoi stantsii IG RAN) // Izvestiya RAN (Akad. Nauk SSSR). Seriya Geograficheskaya. N. 1. P. 125-130.]
- Пискунов Е.Ю. 2012. Модификация коэффициента Тэйла // Известия Иркутской государственной экономической академии. № 5. <https://cyberleninka.ru/article/n/modifikatsiya-koeffitsienta-teyla/viewer> [Piskunov E.Yu. 2012. Modifikatsiya koeffitsienta Teila // Izvestiya Irkutskoi gosudarstvennoi ekonomicheskoi akademii. N. 5. <https://cyberleninka.ru/article/n/modifikatsiya-koeffitsienta-teyla/viewer>]
- Романенков В.А. 2010. Динамика запасов почвенного углерода в ароценозах Европейской территории России (по данным длительных агрохимических опытов): автореф. ... д-ра биол. наук. Москва. [Romanenkov V.A. 2010. Dinamika zapasov pochvennogo ugleroda v arotsenozakh Evropeiskoi territorii Rossii (po dannym dlitel'nykh agrokhimicheskikh opytov): abstract of the dissertation for the degree of Doctor of Biological Sciences. Moskva.]
- Сазонова, Д. Г., Китаев, А. Б. 2013. Использование модели «Гидрограф ГГИ-2001» для оценки притока воды в Камское водохранилище // Географический вестник. № 1(24). С. 52–71. [Sazonova, D. G., Kitaev, A. B. 2013. Ispol'zovanie modeli «Gidrograf GGI-2001» dlya otsenki pritoka vody v Kamское vodokhranilishche // Geographical bulletin. N. 1(24). P. 52–71]
- Сапронов Д.В. 2008. Многолетняя динамика эмиссии CO₂ из серых лесных и дерново-подзолистых почв: автореф. дис. ... канд. биол. наук. Пушкино. [Sapronov D.V. 2008. Mnogoletnyaya dinamika emissii CO₂ iz serykh lesnykh i demovo-podzolistykh pochv: dissertation abstract for the degree of candidate of biological sciences. Pushchino.]
- Семенов В.М., Когут Б.М., Зинякова Н.Б., Масютенко Н.П., Малюкова Л.С., Лебедева Т.Н., Тулина А.С. 2018. Биологически активное органическое вещество в почвах европейской части России // Почвоведение. № 4. С. 457-472. DOI: 10.7868/S0032180X1804007X [Semenov V.M., Zinyakova N.B., Lebedeva T.N., Tulina A.S., Kogut B.M., Masyutenko N.P., Malyukova L.S. 2018. BIOLOGICALLY ACTIVE ORGANIC MATTER IN SOILS OF EUROPEAN RUSSIA // Eurasian Soil Science. N. 4. P. 457-472. DOI: 10.7868/S0032180X1804007X]
- Суховаева О.Э. 2020. В помощь к использованию модели RothC в России: методика подготовки входной информации // Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем. Т. 32, № 3-4. С. 133–148. DOI: 10.21513/0207-2564-2020-3-133-148 [Sukhoveeva O.E. 2020. V pomoshch' k ispol'zovaniyu modeli RothC v Rossii: metodika podgotovki vkhodnoi informatsii // Problemy ekologicheskogo monitoringa i modelirovaniya ekosistem. V. 32, N. 3-4. P. 133–148. DOI: 10.21513/0207-2564-2020-3-133-148]
- Суховаева О.Э., Золотухин А.Н., Карелин Д.В. 2020. Климатообусловленные изменения запасов органического углерода в пахотных черноземах Курской области // Аридные экосистемы. Т. 26. № 2 (83). С. 72–79. DOI: 10.24411/1993-3916-2020-10098 [Sukhoveeva O.E., Zolotukhin A.N., Karelin D.V. 2020. Klimatoobuslovlennyye izmeneniya zapasov organicheskogo ugleroda v pakhotnykh chernozemakh Kurskoi oblasti // Arid ecosystems. V. 26. N. 2

(83). P. 72–79. DOI: 10.24411/1993-3916-2020-10098]

Суховеева О.Э., Карелин Д.В. 2019. Параметризация модели DNDC для оценки компонентов биогеохимического цикла углерода на Европейской территории России // Вестник Санкт-Петербургского университета. Науки о Земле. Т. 64. Вып. 2. С. 363-384. DOI 10.21638/spbu07.2019.211 [Sukhovееva O.E., Karelin D.V. 2019. Parametrizatsiya modeli DNDC dlya otsenki komponentov biogeokhimicheskogo tsikla ugleroda na Evropeiskoi territorii Rossii // Vestnik of Saint-Petersburg University. Earth Sciences. V. 64. N. 2. P. 363-384. DOI 10.21638/spbu07.2019.211]

Суховеева О.Э. 2022. Поступление органического углерода в почву с послеуборочными остатками // Почвоведение. № 6. С. 737-746. DOI: 10.31857/S0032180X22060120 [Sukhovееva O.E. 2022. INPUT OF ORGANIC CARBON IN SOIL WITH POST-HARVEST CROP RESIDUES // Eurasian Soil Science. N. 6. P. 737-746. DOI: 10.31857/S0032180X22060120]

Чертов О.Г., Надпорожская М.А. 2016. Модели динамики органического вещества почв: проблемы и перспективы // Компьютерные исследования и моделирование. Т. 8. № 2. С. 391-399. [Chertov O.G., Nadporozhskaya M.A. 2016. Modeli dinamiki organicheskogo veshchestva pochv: problemy i perspektivy // Komp'yuternye issledovaniya i modelirovanie. V. 8. N. 2. P. 391-399.]

Balashov E., Horak J., Siska B., Buchkina N., Rizhiya E., Pavlik S. 2010. N₂O fluxes from agricultural soils in Slovakia and Russia – direct measurements and prediction using the DNDC model // Folia Oecologica. V. 37. No. 1. P. 8-15.

Chen S., Zou J., Hu Z., Chen H., Lu Y. 2014. Global annual soil respiration in relation to climate, soil properties and vegetation characteristics: Summary of available data // Agricultural and Forest Meteorology. No. 198-199. P. 335-346.

Francioni M., Trozzo L., Toderi M., Baldoni N., Allegrezza M., Tesei G., Kishimoto-Mo A.W., Foresi L., Santilocchi R., D'Ottavio P. 2020. Soil respiration dynamics in Bromus erectus-dominated grasslands under different management intensities // Agriculture. Is. 10 (1). No. 9. DOI: 10.3390/agriculture10010009

Friedlingstein P., Jones M.W., O'Sullivan M., Andrew R.M., Bakker D.C.E., Hauck J., Le Quéré C., Peters G.P., Peters W., Pongratz J., Sitch S., Canadell J.G., Ciais P., Jackson R.B., Alin S.R., Anthoni P., Bates N.R., Becker M., Bellouin N., Bopp L., Chau T.T.T., Chevallier F., Chini L.P., Cronin M., Currie K.I., Decharme B., Djeutchouang L.M., Dou X., Evans W., Feely R.A., Feng L., Gasser T., Gilfillan D., Gkritzalis T., Grassi G., Gregor L., Gruber N., Gürses Ö., Harris I., Houghton R.A., Hurtt G.C., Iida Y., Ilyina T., Luijckx I.T., Jain A., Jones S.D., Kato E., Kennedy D., Klein Goldewijk K., Knauer J., Korsbakken J.I., Körtzinger A., Landschützer P., Lauvset S.K., Lefèvre N., Lienert S., Liu J., Marland G., McGuire P.C., Melton J.R., Munro D.R., Nabel J.E.M.S., Nakaoka S.-I., Niwa Y., Ono T., Pierrot D., Poulter B., Rehder G., Resplandy L., Robertson E., Rödenbeck C., Rosan T.M., Schwinger J., Schwingshackl C., Séférian R., Sutton A.J., Sweeney C., Tanhua T., Tans P.P., Tian H., Tilbrook B., Tubiello F., van der Werf G.R., Vuichard N., Wada C., Wanninkhof R., Watson A.J., Willis D., Wiltshire A.J., Yuan W., Yue C., Yue X., Zaehle S., Zeng J. 2022. Global Carbon Budget 2021 // Earth System Science Data. Is. 14. P. 1917–2005. DOI: 10.5194/essd-14-1917-2022.

Gilhespy S.L., Anthony S., Cardenas L., Chadwick D., del Prado A., Li C., Misselbrook T., Rees R.M., Salas W., Sanz-Cobena A., Smith P., Tilston E.L., Topp C.F.E., Vetter S., Yeluripati J.B. 2014. First 20 years of DNDC (DeNitrification DeComposition): Model evolution // Ecological modelling. No. 292. P. 51-62.

Heikkinen J., Kurganova I., Lopes de Gerenyu V., Palosuo T., Regina K. 2014. Changes in soil carbon stock after cropland conversion to grassland in Russian temperate zone: measurements versus model simulation // Nutrient Cycling in Agroecosystems. V. 98. Is. 1. P. 97-106. DOI: 10.1007/s10705-014-9599-8

Jenkinson D.S., Hart P.B.S., Rayner J.H., Parry L.C. 1987. Modeling the turnover of organic matter in long-term experiments at Rothamsted. INTECOL Bulletin. No. 15. P. 1-8.

Karelin D.V., Sukhovееva O.E. 2022. Contribution analysis of permanent and sporadic controls of CO₂ efflux from chernozems over four seasons // Geography, Environment, Sustainability. Vol.15, № 1. P. 35-45. DOI: 10.24057/2071-9388-2021-042

Kurbatova J., Tatarinov F., Varlagin A., Shalukhina N., Olchev A., Li C. 2009. Modeling of the carbon dioxide fluxes in European Russia peat bogs // Environmental Research Letters. V. 4. No. 4. P. 045022. DOI: 10.1088/1748-9326/4/4/045022

Li C., Frolking S., Frolking T.A. 1992. A model of nitrous oxide evolution from soil driven by rainfall events: 1. Model structure and sensitivity // Journal of geophysical research. V. 97. No. D9. P. 9759-9776.

Moyano F.E., Manzoni S., Chenu C. 2013. Responses of soil heterotrophic respiration to moisture availability: an exploration of processes and models // Soil Biology & Biochemistry. No. 59. P. 72-85.

Reichstein M., Katterer T., Andren O., Ciais P., Schulze E.-D., Cramer W., Papale D., Valentini R. 2005. Temperature sensitivity of decomposition in relation to soil organic matter pools: critique and outlook // Biogeosciences. No. 2. P. 317–321.

Smith J., Smith P., Wattenbach M., Gottschalk P., Romanenkov V.A., Shevtsova L.K., Sirotenko O.D., Rukhovich D.I., Koroleva P.V., Romanenko I.A., Lisovoi N.V. 2007. Projected changes in the organic carbon stocks of cropland mineral soils of European Russia and the Ukraine, 1990-2070 // Global Change Biology. V. 13. P. 342–356. DOI: 10.1111/j.1365-2486.2006.01297.x

Sukhovееva O.E., Karelin D.V. 2019. Application of the DeNitrification-DeComposition (DNDC) model to retrospective analysis of the carbon cycle components in agrolandscapes of the Central Forest zone of European Russia // Geography. Environment. Sustainability. Vol. 12, no. 2. P. 213-226. DOI 10.24057/2071-9388-2018-85

Поступила в редакцию: 22.09.22
Переработанный вариант: 31.12.22
Опубликовано: 31.12.22