

# Параметризация модели DNDC для оценки компонентов биогеохимического цикла углерода на европейской территории России\*

О. Э. Суховеева<sup>1</sup>, Д. В. Карелин<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Институт географии РАН,

Российская Федерация, 119017, Москва, Старомонетный пер., 29

<sup>2</sup> Центр по проблемам экологии и продуктивности лесов,

Российская Федерация, 117997, Москва, ул. Профсоюзная, 84/32

**Для цитирования:** 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*, 64(2), 363–384. <https://doi.org/10.21638/spbu07.2019.211>

Работа посвящена параметризации имитационной модели DNDC (DeNitrification-De-Composition), позволяющей оценивать компоненты биогеохимического цикла углерода в пахотных почвах на европейской территории России (ЕТР). Параметризация базируется на данных официальной статистики, информации из литературных источников и результатах первичной апробации модели, полученных нами ранее. Обоснованы также принципы подготовки входной информации по природным (почвенно-климатические условия) и антропогенным (обработка почвы, внесение удобрений, урожайность) факторам. Скорректированы внутренние коэффициенты DNDC, в том числе характеристики почвенного покрова (глубина пахотного горизонта, отношение C:N и фракций органического вещества) и биологические особенности возделываемых культур (потребности в тепле и влаге, отношение C:N и фракций биомассы), разработано формализованное описание существующих технологий возделывания ключевых культур. Предложен метод комплексной оценки эффективности моделирования, состоящий из пяти компонентов: 1) коэффициента Нэша — Сатклиффа, 2) коэффициента Тэйла, 3) корреляционного анализа, 4) однофакторного дисперсионного анализа, 5) двухвыборочного F-теста дисперсий. Адаптированная к условиям России модель DNDC верифицирована на примере двух полевых опытов по измерению эмиссии CO<sub>2</sub> из почвы в Курской и Московской областях, а также по данным литературы на примерах эмиссии CO<sub>2</sub> и баланса углерода в пахотных почвах Владимирской, Курской, Московской, Орловской и Самарской областей. На этапе верификации правильность полученных результатов подтверждена совокупностью значимых статистических критериев: между полевыми и смоделированными значениями эмиссии CO<sub>2</sub> наблюдалась средняя прямая корреляционная связь, по результатам однофакторного дисперсионного анализа средние измеренные и расчетные значения эмиссии были равны, коэффициент Тэйла не превышал 0,3, положительные значения коэффициента Нэша — Сатклиффа доказывали состоятельность внесенных в модель изменений. По результатам исследо-

\* Параметризация модели, анализ климатических условий и разработка метода пяти компонентов для оценки эффективности моделирования проведены в соответствии с темой ГЗ № 0148-2018-0006 (перерегистр. № 0148-2019-0009) и Программой Президиума РАН № 51 (№ 0148-2018-0036). Верификация и сравнение эффективности моделирования по данным полевых опытов сделаны в рамках проекта РНФ № 18-17-00178.

© Санкт-Петербургский государственный университет, 2019

вания была подтверждена эффективность применения разработанной методики для оценки составляющих биогеохимического цикла углерода на ЕТР.

*Ключевые слова:* биогеохимический цикл углерода, европейская территория России, модель DNDC, почвенный органический углерод, пахотные почвы, эмиссия диоксида углерода, CO<sub>2</sub>.

## 1. Введение

В науках о Земле длительное время с успехом используются методы математического моделирования, заменяющие собой эксперименты (там, где последние невозможны) или прямые измерения (там, где их проведение затруднено). Значение имитационного моделирования особенно возрастает при современных быстрых климатических изменениях, поскольку они не позволяют использовать результаты предыдущих инструментальных измерений для экстраполяции данных при построении моделей других типов (Алферов и др., 2017).

Модель DNDC (DeNitrification-DeComposition) — процессно-ориентированная имитационная модель, созданная для оценки динамики основных компонентов биогеохимических циклов углерода (C) и азота (N), в том числе биогенных парниковых газов, в почвах сельскохозяйственного назначения (Li et al., 1992).

Основными причинами, по которым была выбрана эта модель, стали ее международное признание, широкое и успешное применение в мире, комплексный учет циклов C и N в пахотных почвах, а также возможность настроить ее под конкретные условия региона. Так, DNDC рекомендуется<sup>1</sup> Рамочной конвенцией ООН по изменению климата (РКИК ООН) в качестве альтернативы<sup>2</sup> методикам Межгосударственной группы экспертов по изменению климата (МГЭИК). Продовольственная и сельскохозяйственная организация ООН (ФАО) также допускает использование этой модели для оценки эмиссии парниковых газов от сельского хозяйства<sup>3</sup>.

DNDC была апробирована в различных географических регионах и для разных вариантов землепользования в 14 странах мира (Bolan et al., 2004), применялась в нескольких крупных международных проектах (Giltrap et al., 2010). Она показала хорошие результаты при моделировании потоков C и N в Азии (Frolking et al., 2004; Pathak et al., 2005; Li et al., 2005), США (Li, 2008), Канаде (Yadav and Wang, 2017; Guest et al., 2017) и Австралии (Chen et al., 2013). В последние годы были предприняты попытки использовать DNDC в России для анализа эмиссии закиси азота (N<sub>2</sub>O) из почвы, занятой овощными культурами (Balashov et al., 2014), но до настоящего времени она еще не была апробирована в нашей стране для оценки параметров цикла C.

---

<sup>1</sup> Estimation of emissions from agriculture. См.: <http://unfccc.int/resource/docs/2004/sbsta/inf04.pdf> (дата обращения: 07.05.2019).

<sup>2</sup> Recommendations by the SSC WG to the CDM executive board. Report of the thirty-eighth meeting of the Small-Scale Working Group. 20–23 August 2012 Bonn, Germany. См.: [https://cdm.unfccc.int/Panels/ssc\\_wg/meetings/038/ssc\\_38\\_mr.pdf](https://cdm.unfccc.int/Panels/ssc_wg/meetings/038/ssc_38_mr.pdf) (дата обращения: 07.05.2019).

<sup>3</sup> Метод оценки углеродного баланса на основе предполагаемых величин (EX-ACT) (User Friendly Manual of the EX-Ante Carbon-balance Tool, 2013). См.: [http://www.fao.org/fileadmin/templates/ex\\_act/pdf/Technical\\_guidelines/EX-ACT\\_User\\_Manual\\_Final\\_Draft\\_v01.pdf](http://www.fao.org/fileadmin/templates/ex_act/pdf/Technical_guidelines/EX-ACT_User_Manual_Final_Draft_v01.pdf) (дата обращения: 08.05.2019).

Несмотря на сложность структуры и математического аппарата, интеграция циклов С и N в имитационных моделях обеспечивает наиболее полный, точный и сбалансированный учет потоков С, в том числе отражение его обратных связей с температурой, снижение интенсивности поглощения диоксида углерода (CO<sub>2</sub>) растительным покровом и изменение скорости разложения органического вещества почвы (Jain et al., 2009; Sokolov et al., 2008; Thornton et al., 2009).

Цель работы — параметризовать модель DNDC для оценки компонентов биогеохимического цикла С в пахотных почвах европейской территории России (ЕТР). При этом в задачи исследования входило следующее:

- 1) составление рекомендаций по сбору и подготовке входных данных для использования их в модели;
- 2) корректировка внутренних параметров модели на основании литературных данных в соответствии с условиями целевого региона;
- 3) верификация адаптированной версии DNDC с помощью сравнения результатов моделирования с данными измерений в полевых опытах.

## 2. Материалы и методы

Решить ключевую проблему имитационного моделирования, связанную с зависимостью его точности от большого объема и высокого качества входных данных<sup>4</sup>, можно с привлечением официальной статистической информации. Важно, что углеродный режим пахотных почв формируется под воздействием природных и антропогенных факторов, и, чтобы учесть их при моделировании, требуется комплексная методика сбора, обработки и подготовки входных данных.

Чтобы DNDC наиболее точно отражала биогеохимический цикл С в конкретном регионе, ее необходимо модифицировать или настроить в соответствии со специфическими географическими условиями местности (Cai et al., 2003), т.е. калибровать модель по месту. Для этого требуется параметрическая идентификация характеристик возделываемых культур и других входных параметров (Gilhiespy et al., 2014). Чтобы адаптировать DNDC для применения в России, мы уточнили на основе данных литературных источников ее внутренние настроечные параметры и принимаемые по умолчанию коэффициенты.

Заключительный этап работы с моделью и основной способ ее проверки — верификация, т.е. сравнение расчетных данных с результатами полевых наблюдений (Blagodatsky et al., 1998; Scurlock et al., 1999). В настоящем исследовании разработанная методика верифицировалась на результатах двух полевых опытов, в которых камерным методом измерялась эмиссия CO<sub>2</sub> из пахотных почв (дыхание почвы), расположенных на ЕТР в различных почвенно-климатических условиях:

- 1) на Курской биосферной станции Института географии РАН (КБС ИГ РАН): Курская обл., Медвенский р-н, с. Панино (51°54' с. ш., 36°10' в. д.), чернозем выщелоченный, озимая пшеница, ячмень, картофель, подсолнечник, период измерений — с апреля по октябрь 2017 г., 1 раз в 10–15 сут., портатив-

<sup>4</sup> Estimation of emissions from agriculture. См.: <http://unfccc.int/resource/docs/2004/sbsta/inf04.pdf> (дата обращения: 07.05.2019).

ные инфракрасные газоанализаторы AZ 7752 (AZinstruments, Taiwan) и LI-8100A (Li-Cor, Nebraska, USA);

- 2) на Полевой опытной станции Института физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН (ИФХиБПП РАН): Московская обл., Серпуховской р-н, г. Пущино (54°49' с. ш., 37°34' в. д.), серая лесная обычная окультуренная почва, зернопаровой севооборот, круглогодичные измерения за 1997–2009 гг., 1 раз в 7–10 сут., газовые хроматографы Chrom-5, ЧССР, «Кристалл-2000» (Россия).

Данные опыта ИФХиБПП РАН опубликованы в работах (Курганова, 2010; Kurganova et al., 2011; Larionova et al., 2010). Мы использовали их ранее для первичной апробации модели DNDC (Суховеева и др., 2018).

Эффективность моделирования мы проверяли с помощью набора из пяти компонентов:

1. Коэффициент Нэша — Сатклиффа ( $E_m$ ) — статистическая мера, отражающая долю дисперсии наблюдаемых величин и обоснованная рассчитанными значениями (Сазонова и Китаев, 2013). Он рекомендуется Всемирной метеорологической организацией ООН (ВМО) как один из критериев для сравнительного анализа эффективности моделей (Shamseldin and O'Connor, 2001). Значения  $E_m$  лежат в диапазоне  $(-\infty; 1]$ . При  $E_m < 0$  модель несостоятельна, при  $E_m > 0$  она эффективна. Соответственно, чем значение  $E_m$  ближе к 1, тем точнее воспроизводится реальный процесс (Nash and Sutcliffe, 1970). Коэффициент рассчитывается по формуле

$$E_m = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (X_{\text{реал}} - X_{\text{модел}})^2}{\sum_{i=1}^N (X_{\text{реал}} - X_{\text{сред}})^2},$$

где  $X_{\text{реал}}$  и  $X_{\text{модел}}$  соответственно реальные и смоделированные значения;  $X_{\text{сред}}$  — среднее реальное значение;  $N$  — число пар значений.

2. Коэффициент Тэйла ( $T$ ) показывает степень схожести временных рядов и существенно зависит от их дисперсии. Значения коэффициента  $T$  лежат в диапазоне  $[0; 1]$ , и чем ближе он к нулю, тем точнее моделирование; при исследовании природных процессов порог его значимости составляет  $T \leq 0,3$  (Тэйл, 1977). Фактически он равен отношению среднеквадратической ошибки прогнозов к корню квадратному из среднего квадрата реализации (Пискунов, 2012) и рассчитывается по формуле

$$T = \frac{\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (X_{\text{реал}} - X_{\text{модел}})^2}}{\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N X_{\text{реал}}^2 + \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N X_{\text{модел}}^2}},$$

где  $X_{\text{реал}}$  и  $X_{\text{модел}}$  соответственно реальные и смоделированные значения;  $N$  — число пар значений.

3. Корреляционный анализ — коэффициент корреляции Пирсона ( $r_p$ ) дает возможность проверить наличие связи между измеренными и смодели-

рованными значениями: при  $r_p = 0 \pm 0,4$  связь слабая, при  $\pm 0,4 < r_p < \pm 0,7$  — средняя, при  $\pm 0,7 < r_p < \pm 1$  — сильная. Уровень значимости  $P < 0,05$ .

4. Однофакторный дисперсионный анализ позволяет оценить равенство средних значений выборок по совокупности двух критериев: средние расчетные и полевые значения равны (принимается нулевая гипотеза), если  $F < F_{\text{крит}}$  и  $P > 0,05$ .
5. Двухвыборочный F-тест дисперсий помогает определить равенство дисперсий выборок по совокупности двух критериев: дисперсии измеренных и смоделированных значений равны (принимается нулевая гипотеза), если  $F < F_{\text{крит}}$  и  $P > 0,05$  (Чертко и Карпиченко, 2008).

Второй подход к верификации DNDC заключался в сравнении ее выходных значений с данными измерений, опубликованными в литературе. При воспроизведении каждого случая мы прорабатывали несколько возможных сценариев с изменением особенностей технологии возделывания (в частности, с изменением сроков проведения агротехнических мероприятий), поскольку, в отличие от сведений о климатических и почвенных условиях, эти данные редко встречаются в литературных источниках. Так, при одном прогоне модели мы вводили сроки проведения агротехнических мероприятий наиболее ранние из всех возможных, а при другом — наиболее поздние.

### 3. Результаты

*Сбор и подготовка входных данных.* Входные численные значения модели делятся на два типа:

- 1) данные открытого типа — вакантные пустые ячейки, куда пользователь вносит свои сведения;
- 2) коэффициенты, принимающиеся по умолчанию — заложены в модель, но пользователь может их скорректировать.

Для данных первого типа требуются официальные сведения. В табл. 1 приведены апробированные на конечных результатах рекомендуемые методики получения и подготовки входных данных этого типа с указанием источника информации и способов ее обработки.

*Корректировка внутренних параметров.* Чтобы определить необходимость корректировки данных второго типа, ранее мы оценили чувствительность модели (Суховеева, 2018), которая показала, что на региональные циклы C и N и на эмиссию парниковых газов ключевое влияние оказывают антропогенные факторы, а среди них наиболее велико воздействие вносимых удобрений. В той же работе было отмечено, что складывающиеся погодные условия, гранулометрический состав почвы и содержание в ней органического углерода являются важнейшими факторами, определяющими изменение его содержания. Эмиссия CO<sub>2</sub> чувствительна к биологическим особенностям культур и интенсивности почвообрабатывающих мероприятий в технологиях их возделывания.

Именно поэтому при настройке модели мы прежде всего уточняли характеристики почвенного покрова и особенности биологии возделываемых культур. Среди характеристик почвы мы скорректировали соотношение фракций

Таблица 1. Рекомендуемые источники и методы подготовки данных для моделирования

Блок данных	Источник данных	Методика получения входной информации
	Природные факторы	
Климатические условия	ВНИИ гидрометеорологической информации — Международный центр данных <sup>1</sup>	Пространственное усреднение данных температуры и осадков по региону на основе сетки с разрешением 2,5° широты на 5,0° долготы или усреднение на основе административно-территориального деления (Суховеева, 2016)
Характеристики почвенного покрова	Единый государственный реестр почвенных ресурсов России (Алябина и др., 2014)	Учет характеристик преобладающего типа почвы
	Антропогенные факторы	
Агротехника сельскохозяйственных культур	(Грачев, 1980; Коледа и др., 2010; Типовые..., 1984) и другие аналогичные технологические карты	Прямой перенос данных с желательным уточнением дат и использованных приемов обработки почвы на конкретных участках
Урожайность сельскохозяйственных культур	Федеральная служба государственной статистики (Росстат) <sup>2</sup>	Прямой перенос данных с желательным уточнением продуктивности на конкретных участках
Содержание углерода в растительной биомассе	Методические указания по количественному определению объема поглощения парниковых газов <sup>3</sup>	Расчет на основе утвержденных коэффициентов
Количество азотных удобрений	Внесение..., 1990–2015	Расчет через отношение общего объема азотных удобрений, внесенных под конкретную культуру в области, к удобренной площади; или через пропорцию между массой и дозой внесенных минеральных удобрений и массой азотных удобрений: $n_N = \frac{M_N}{S_{\text{мин}}} \approx \frac{M_N n_{\text{мин}}}{M_{\text{мин}}}$ где $n_N$ — доза азотных удобрений, кг/га; $M_N$ — масса азотных удобрений, тыс. га; $S_{\text{мин}}$ — площадь, удобренная минеральными удобрениями, тыс. га; $n_{\text{мин}}$ — доза минеральных удобрений, кг/га; $M_{\text{мин}}$ — масса минеральных удобрений, тыс. ц (Суховеева, 2018)

<sup>1</sup> Специализированные массивы для климатических исследований. См.: <http://aisori-m.meteo.ru/waisori/select.xhtml> (дата обращения: 08.05.2019).

<sup>2</sup> Единая межведомственная информационно-статистическая система. См.: <https://fedstat.ru/> (дата обращения: 08.05.2019).

<sup>3</sup> Утверждены Распоряжением Минприроды России от 30.06.2017 г. № 20-р. См.: <http://docs.cntd.ru/document/456079177> (дата обращения: 08.05.2019).

органического вещества, отношение С : N в нем и мощность верхнего слоя в соответствии особенностями почвенного покрова, характерными для ЕТР. В табл. 2 приведена корректировка параметров для тех типов почв, которые мы использовали при верификации модели.

Таблица 2. Корректировка принятых в DNDC по умолчанию параметров почвенного покрова для условий России

Показатель	Параметр			Источник
	по умолчанию	скорректированный		
		Значение	Тип почвы	
Фракция легкорастворимого гумуса	0,0138	0,335	Серые лесные	Larionova et al., 2011; Люри и др., 2010
		0,30	Выщелоченные черноземы	
Фракция труднорастворимого гумуса	0,9762	0,655	Серые лесные	
		0,45	Выщелоченные черноземы	
Мощность верхнего слоя почвы, см	20	10	Дерново-подзолистые преимущественно неглубоко-подзолистые	Алябина и др., 2014
		21	Дерново-подзолистые преимущественно мелко и неглубокоподзолистые	
		20	Серые лесные	
		25	Выщелоченные черноземы	
Соотношение С : N в органическом веществе	10	9	Дерново-подзолистые иллювиально-железистые	
		11,9	Дерново-подзолистые остаточо-карбонатные	
		12	Серые лесные	
		11,5	Выщелоченные черноземы	

Наиболее значительные изменения коснулись блока сельскохозяйственных растений. Так, для ключевых культур Нечерноземья были уточнены их потребности в тепле и влаге (табл. 3) в соответствии с особенностями возделываемых в регионе сортов, соотношение фракций биомассы (зерно : стебли : листья : корни) на базе уравнений, применяемых для оценки пожнивных и корневых остатков в России, а также отношение С : N в биомассе (табл. 4).

На основе собранных и систематизированных данных было разработано формализованное описание нормативных технологий возделывания ключевых товарных культур района — озимой пшеницы и картофеля — в используемом моделью формате (табл. 5). Временной подход, примененный в таблицах, позволяет смещать



Таблица 3. Корректировка принятых в DNDC по умолчанию потребностей сельскохозяйственных культур в тепле и влаге для условий России

Культура	Параметр					
	по умолчанию		скорректированный <sup>1</sup>			
	Потребность в тепле, °С	Коэффициент водо-потребления	Потребность в тепле, °С		Коэффициент водопотребления	
			среднее	диапазон	среднее	диапазон
Озимая пшеница	1300	200	2000	1850–2200	380	340–420
Озимая рожь	2000	250	3125	3000–3250	345	270–420
Ячмень	1300	250	1250	1000–1500	375	300–450
Овес	1650	250	1250	1000–1500	475	470–480
Картофель	2100	415	1300	1000–1600	625	600–650
Подсолнечник	1500	495	2300	2200–2400	485	400–570

<sup>1</sup> По данным (Посыпанов и др., 2007; Шевченко, 2002).

даты проведения почвообрабатывающих мероприятий, в частности, посева/посадки и (относительно указанных дат) других технологических приемов в зависимости от климатических условий рассматриваемого региона, погодных условий конкретного года и особенностей возделываемых сортов. Выражение количества удобрений в относительных величинах по различным срокам внесения позволяет учесть его ежегодные изменения.

*Верификация параметризованной модели.* При оценке работы исходной версии модели лишь небольшая часть показателей эффективности свидетельствовала о соответствии измеренных и расчетных значений эмиссии CO<sub>2</sub> в полевых опытах (табл. 6), что и послужило стимулом для того, чтобы начать исследования, представленные в настоящей статье, и скорректировать внутренние параметры и настройки DNDC.

Оценка эффективности моделирования с помощью разработанного метода пяти компонентов после параметризации DNDC для условий ЕТР показала, что адаптированная модель точнее и качественнее исходной рассчитывает потоки CO<sub>2</sub> в агроландшафтах, что подтверждается высокими корреляциями между наблюдаемыми и расчетными значениями и равенством их средних показателей.

Для обоих полевых опытов положительные значения коэффициентов Нэша — Сатклиффа свидетельствовали о состоятельности разработанной методики. В опыте ИФХиБПП РАН эмиссия CO<sub>2</sub> на парующей почве, представленная только микробным дыханием, отражалась имитационной моделью с высокой точностью. Немного хуже было значение критерия для дыхания почвы под картофелем (табл. 6).

В опыте КБС для всех четырех культур коэффициенты Тэйла были ниже 0,3, что доказывало высокую точность воспроизведения моделью дыхания почвы. Во всех примерах были отмечены значимые средние прямые корреляции между



Таблица 4. Корректировка принятых в DNDC по умолчанию характеристик биомассы сельскохозяйственных культур для условий России

Культура	Содержание С в биомассе <sup>1</sup> , %	Критерии	Параметр									
			По умолчанию					Скорректированный				
			Основная продукция (зерно/ клубнеплоды)	Стебли	Листья	Корни	Основная продукция (зерно/ клубнеплоды)	Стебли	Листья	Корни		
Озимая пшеница	48,53	Фракции биомассы <sup>2</sup>	0,41	0,21	0,21	0,17	0,22	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26
			С: N в биомассе <sup>3</sup>	40	95	95	95	— <sup>4</sup>	80	80	80	52
Ячмень	45,67	Фракции биомассы	0,30	0,23	0,23	0,23	0,26	0,23	0,22	0,23	0,29	
			С: N в биомассе	45	75	75	85	—	80	80	80	59,5
Овес	45,0	Фракции биомассы	0,23	0,27	0,27	0,23	0,25	0,24	0,24	0,24	0,27	
			С: N в биомассе	35	75	75	85	—	60	60	60	59,5
Озимая рожь	45,0	Фракции биомассы	0,28	0,23	0,23	0,25	0,21	0,27	0,27	0,27	0,25	
			С: N в биомассе	20	50	50	50	—	85	85	85	52
Картофель	42,26	Фракции биомассы	0,70	0,13	0,13	0,05	0,78	0,06	0,06	0,07	0,09	
			С: N в биомассе	60	60	60	60	—	—	—	—	25

<sup>1</sup> Методические указания по количественному определению объема поглощения парниковых газов. Утверждены Распоряжением Минприроды России от 30.06.2017 г. № 20-р. См.: <http://docs.spntd.ru/document/456079177> (дата обращения: 08.05.2019).

<sup>2</sup> Корректировались для всех культур на основе расчетов по уравнениям (Левин, 1977).

<sup>3</sup> Корректировались для всех культур по данным работ (Назаренко и др., 2011; Новиков и Кисаров, 2012).

<sup>4</sup> Знак «—» обозначает, что корректировка не вносилась ввиду отсутствия данных.

Таблица 5. Формализованные для моделирования технологии возделывания сельскохозяйственных культур\*

Технологический прием	Картофель			Озимая пшеница		
	Срок выполнения	Глубина обработки, см	Доля вносимых удобрений от их общего количества	Срок выполнения	Глубина обработки, см	Доля вносимых удобрений от их общего количества
Лушение стерни	III декада июля	6–8	—	I декада августа	6–8	—
Внесение органических удобрений	—	—	—	Через 1 сут.	—	100%
Пахота с боронованием и внесением минеральных удобрений	—	—	—	Еще через 1 сут.	20–22	50%
Предпосевная культивация	—	—	—	Через 3 сут.	12–14	—
Посев с внесением минеральных удобрений	—	—	—	II декада августа (на севере раньше, на юге позже)	—	30%
Внесение органических удобрений и вспашка	III декада августа	20–22	100%	—	—	—
Внесение минеральных удобрений	Через 7–10 сут.	—	55%	—	—	—
Ранневесеннее боронование	II декада апреля	—	—	I декада апреля	—	—
Внесение минеральных удобрений	—	—	—	Через 1 сут.	—	20%

Перепашка зяби	Еще через 5 сут.	20–22	—	—	—	—
Культивация и нарезка гребней с внесением минеральных удобрений	Еще через 5 сут.	12–14	45%	—	—	—
Посев/посадка	I декада мая (на юге раньше, на севере позже)	—	—	—	—	—
Первое дождевое рыхление	Через 5 сут.	5–6	—	—	—	—
Второе дождевое рыхление	Еще через 5 сут.	5–6	—	—	—	—
Послевходное рыхление междурядий	I декада июня	12–14	—	—	—	—
Окучивание	I декада июля	—	—	—	—	—
Предуборочное рыхление	III декада августа	12–14	—	—	—	—
Уборка	I декада сентября (на севере раньше, на юге позже)	—	—	III декада августа (на юге раньше, на севере позже)	—	—

Примечание: \* По материалам (Грачев, 1980; Евстиропов, 2011; Зинченко и др., 2012; Коледа и др., 2010; Типовые..., 1984).  
 Прочерком обозначены приемы, не предусмотренные для технологии возделывания конкретной культуры.

Таблица 6. Сравнение эффективности моделирования с помощью исходной и адаптированной версий DNDC

Компоненты оценки эффективности	Версия модели, параметр	Опыт						Чистый пар
		КБС ИГ РАН			Полевая станция ИФХиБПП РАН <sup>1</sup>			
		Картофель	Озимая пшеница	Ячмень	Подсолнечник	Озимая пшеница	Культура	
Коэффициент Нэша — Сатклиффа	Исходная	-1,739	-0,873	-1,596	0,227 <sup>2</sup>	-0,199	0,124	
	Адаптированная	-0,021	0,230	0,023	0,256	0,197	0,520	
Коэффициент Тэйла	Исходная	0,547	0,566	0,366	0,272	0,679	0,512	
	Адаптированная	0,256	0,268	0,202	0,263	0,374	0,287	
Корреляционный анализ	Исходная	-0,219	-0,100	0,086	0,630	0,265	0,350	
	r <sub>p</sub>	0,259	0,028	0,028	0,005	<0,001	<0,001	
	Адаптированная	0,300	0,531	0,533	0,662	0,546	0,723	
	r <sub>p</sub>	0,259	0,028	0,028	0,005	<0,001	<0,001	
Однофакторный дисперсионный анализ	Исходная	20,055	8,425	3,870	1,939	22,106	1,268	
	F	4,171	4,149	4,149	4,171	3,856	3,880	
	F <sub>крит</sub>	<0,0001	0,007	0,058	0,174	<0,0001	0,261	
	Р	1,020	0,591	0,975	1,405	21,116	0,211	
Двухвыборочный F-тест дисперсий	Исходная	9,102	9,450	1,169	2,035	2,407	3,399	
	F	2,403	2,333	2,333	2,403	1,204	1,347	
	F <sub>крит</sub>	<0,0001	<0,0001	0,379	0,090	<0,0001	<0,0001	
	Р	4,559	4,989	1,186	1,707	2,476	1,913	
F-тест дисперсий	F	2,403	2,333	2,333	2,403	1,204	1,347	
	F <sub>крит</sub>	0,002	0,001	0,368	0,156	<0,001	<0,001	
	Р							

<sup>1</sup> По данным (Суховеева и др., 2018).

<sup>2</sup> Серым фоном отмечены ячейки, в которых значения критериев доказывают соответствие измеренных и смоделированных значений.

Таблица 7. Верификация модели DNDC на ЕТР по опубликованным результатам полевых измерений

Регион	Почва	Период	Культура	Годовой баланс С в почве, кг С га <sup>-1</sup> год <sup>-1</sup>		Годовая эмиссия CO <sub>2</sub> из почвы, кг С га <sup>-1</sup> год <sup>-1</sup>		Сезонная эмиссия CO <sub>2</sub> из почвы, г С м <sup>-2</sup> ч <sup>-1</sup>		Источник
				Полевая оценка	Модель	Полевая оценка	Модель	Полевая оценка	Модель	
Пущино, опытная станция ИФХиБП РАН <sup>1</sup>	Серая лесная тяжелосуглинистая	2000–2004	Севооборот озимая пшеница — чистый пар	250	162,6–277,7	3304	2258–3664	—	—	Сапронов, 2008
Владимирская обл., длительный стационарный опыт ВНИИОУ <sup>2</sup>	Дерново-подзолистая супесчаная, глееватая	2004–2014	Картофель, без удобрений	-1004	-247,6...-558,0	1753	427–800	—	—	Лукин, 2015
Москва, длительный полевой опыт ТСХА <sup>3</sup>	Дерново-подзолистая легкосуглинистая	2005–2008	Бесменный чистый пар	+6016	+4987,9...+6111,0	3019	1307–4074	—	—	Чистотин и Сафонов, 2016
				—	—	788–3066	701–2540	—	—	
Орловская обл., запад	Серая лесная	2013	Озимая пшеница	—	—	7850	7420–8196	—	—	Karelin et al., 2017
Московская обл., УОПЭЦ «Чашниково» <sup>4</sup>	Дерново-подзолистая суглинистая	Май — июль 2009	Овес	—	—	—	—	Максимум ~0,600	0,068–0,245	Гончарова и Телесникова, 2010
Центр точного земледелия, РГАУ-МСХА, Москва <sup>5</sup>	Дерново-подзолистая	Январь — август 2015	Картофель	—	—	—	—	0,054–0,324	0,075–0,175	Мазиров и др., 2015
Самарская обл., Опытное поле Самарской ГСХА <sup>6</sup>	Чернозем обыкновенный	Лето 2011–2013	Яровая пшеница	—	—	—	—	0,212–0,222	0,069–0,217	Марковская и др., 2015

<sup>1</sup> ИФХиБП РАН — Институт физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН.

<sup>2</sup> ВНИИОУ — Всероссийский научно-исследовательский институт органических удобрений и торфа.

<sup>3</sup> ТСХА — Тимирязевская сельскохозяйственная академия, ныне Российский государственный аграрный университет — Московская сельскохозяйственная академия им. К. А. Тимирязева.

<sup>4</sup> УОПЭЦ «Чашниково» — учебно-опытный почвенно-экологический центр Московского государственного университета им. М. В. Ломоносова.

<sup>5</sup> РГАУ-МСХА — Российский государственный аграрный университет — Московская сельскохозяйственная академия им. К. А. Тимирязева.

<sup>6</sup> Самарская ГСХА — Самарская государственная сельскохозяйственная Академия, ныне Самарский государственный аграрный университет. Прочерком обозначено, что при данном сочетании верификация не проводилась ввиду отсутствия полевых данных.

измеренными и расчетными показателями эмиссии. По результатам однофакторного дисперсионного анализа в большинстве случаев принималась нулевая гипотеза о равенстве средних значений, полученных на основе полевых измерений и путем моделирования. Двухвыборочный тест дисперсий полевых и модельных данных показал их равенство для подсолнечника и ячменя в опыте КБС.

При дальнейшей верификации модели по данным литературных источников мы рассмотрели несколько примеров оценки баланса С, эмиссии CO<sub>2</sub> и соотношения различных потоков CO<sub>2</sub> в агроценозах на различных типах почв в Московской, Владимирской, Орловской и Самарской областях, которые подтвердили, что DNDC демонстрирует высокую эффективность при работе с данными, полученными на ЕТР. Практически во всех примерах расчетные показатели соответствовали наблюдаемым, средние полевые значения входили в диапазон возможных значений, полученных по модели (табл. 7). Хотя в некоторых случаях смоделированные показатели оказались занижены: например, баланс С в варианте опыта с картофелем без удобрений во Владимирской области и пик эмиссии CO<sub>2</sub> в летнее время под овсом в Московской области. Пропорции между потоками CO<sub>2</sub>, смоделированными в настоящем исследовании и полученными ранее другими исследователями, совпадали (табл. 8).

Таблица 8. Верификация модели DNDC путем расчета соотношения потоков CO<sub>2</sub> на примере озимой пшеницы

Поток CO <sub>2</sub>	Модельная оценка	Литературная оценка	Место получения	Источник
Соотношение корневого (числитель) и микробного (знаменатель) дыхания	0,33 0,67	0,34–0,38 0,62–0,66	Пущино, опытная станция ИФХ и БПП РАН	Курганова, 2010
Отношение дыхания к фотосинтезу	0,34–0,36	0,35–0,60	Лабораторный опыт	Gifford, 1995

#### 4. Обсуждение

В ходе исследования на примере полевых опытов в различных почвенно-климатических условиях на ЕТР мы доказали эффективность применения разработанной методики параметризации модели DNDC для анализа компонентов цикла С. Сопоставимость расчетных и полевых потоков CO<sub>2</sub> подтверждена совокупностью значимых статистических критериев. Хотя при сравнении смоделированных значений с измеренными важно помнить, что количественные характеристики последних сильно зависят от внешних условий и метода определения, что было доказано на примере дыхания почвы (Larionova et al., 2006).

Среди погрешностей моделирования выявлено недостаточно корректное воспроизведение моделью DNDC дыхания почвы под картофелем. Наиболее вероятная причина этого, по нашему мнению, — специфические биологические особенности данной культуры, связанные с преимущественным ростом подземной биомассы при формировании урожая основной продукции, тогда как модель в основ-

ном создавалась на примерах зерновых культур, у которых преобладает надземная часть, в том числе фракция зерна (Li et al., 1992).

Другим недостатком моделирования стало отмеченное выше несовпадение дисперсий для рассчитанных моделью и измеренных в опытах показателей дыхания почвы. Подобное явление было также отмечено разработчиками DNDC при верификации ее углеродного блока (Li et al., 1997). При оценке равновесного содержания органического углерода в почве на примере восьми участков пашни и трех сенокосов, расположенных в Европе и Австралии, превышение вариабельности полевых данных над дисперсией смоделированных значений объяснялось изменчивостью урожайности культур, наличием сорняков, особенностями управления растительными остатками, а также различной долей чистого пара в севооборотах.

Как мы отмечали при использовании данных литературных источников для верификации модели (табл. 7), в некоторых случаях она занижает баланс C и летнюю эмиссию CO<sub>2</sub>. Аналогичная ошибка имела место при оценке DNDC почвенного дыхания на орошаемых посевах хлопка в Китае, когда модель недооценивала общую эмиссию CO<sub>2</sub> на 15 %, а гетеротрофное дыхание — на 59 %, хотя расчетные и измеренные значения отличались высокими корреляциями (Yu and Zhao, 2015).

В нашей предыдущей работе (Суховеева и др., 2018) показано, что основная причина выявленного занижения показателей эмиссии CO<sub>2</sub> из почвы — уменьшение интенсивности дыхания корней летом. Это связано со встроенной в модель функцией снижения роста растений в случае превышения оптимального температурного порога, пересыхания пахотного слоя почвы или недостаточного содержания в нем N. Такой подход можно считать оправданным, поскольку температурный, водный и азотный стресс действительно способствуют снижению дыхания (Luo and Zhou, 2006).

Разработанную методику можно использовать для оптимизации принципов инвентаризации потоков парниковых газов на территории России, а также в качестве базы для планирования и организации деятельности, направленной на снижение эмиссии CO<sub>2</sub> в результате землепользования. Кроме того, представленные нами исследования создают методологическую основу для оценки влияния климатических изменений на различные компоненты сельскохозяйственного производства.

## 5. Выводы

На базе сведений официальной статистики и информации литературных источников была разработана методика применения модели DNDC в России, в том числе скорректированы ее внутренние параметры и обоснованы принципы подготовки входной информации.

Верификация разработанного подхода доказала его эффективность при оценке составляющих биогеохимического цикла C на европейской территории страны.

\* \* \*

Авторы благодарны доктору биологических наук, доценту, ведущему научному сотруднику лаборатории почвенных циклов азота и углерода ИФХиБПП РАН — ФИЦ «Пушинский научный центр биологических исследований РАН» И. Н. Кургановой за предоставленные данные полевого опыта и научные консультации при выполнении исследования.



## Литература

- Алферов, А. М., Блинов, В. Г., Гитарский, М. Л., Грабар, В. А., Замолодчиков, Д. Г., Зинченко, А. В., Иванова, Н. П., Ивахов, В. М., Карабань, Р. Т., Карелин, Д. В., Калюжный, И. Л., Кашин, Ф. В., Конюшков, Д. Е., Коротков, В. Н., Кровотынцев, В. А., Лавров, С. А., Марунич, А. С., Парамонова, Н. Н., Романовская, А. А., Трунов, А. А., Шилкин, А. В., Юзбеков, А. К., 2017. Мониторинг потоков парниковых газов в природных экосистемах. Амирит, Саратов.
- Алябина, И. О., Андроханов, В. А., Вершинин, В. В., Волков, С. Н., Ганжара, Н. Ф., Добровольский, Г. В., Иванов, А. В., Иванов, А. Л., Иванова, Е. А., Ильин, Л. И., Карпачевский, М. Л., Каштанов, А. Н., Кирюшин, В. И., Колесникова, В. М., Колесникова, Л. Г., Лойко, П. Ф., Маньков, И. Е., Маречек, М. С., Махинова, А. Ф., Молчанов, Э. Н., Прохоров, А. Н., Пягай, Э. Т., Рожков, В. А., Рыбальский, Н. Н., Савин, И. Ю., Самойлова, Н. С., Сапожников, П. М., Сизов, В. В., Столбовой, В. С., Суханов, П. А., Урусевская, И. С., Чочаев, А. Х., Шеремет, Б. В., Шоба, С. А., Яковлев, А. С., 2014. Единый государственный реестр почвенных ресурсов России. Версия 1.0. Почвенный институт им. В. В. Докучаева Россельхозакадемии, Москва.
- Внесение удобрений под урожай 1990–2014 гг. и проведение работ по химической мелиорации земель, 1991–2015. Росстат, ГМЦ, Москва.
- Гончарова, О. Ю., Телеснина, В. М., 2010. Биологическая активность постагрогенных почв (на примере Московской области). Вестник Московского ун-та. Серия 17. Почвоведение 4, 24–31.
- Грачев, В. А., 1980. Типовые технологические карты для планирования и организации производства зерна, кормов, картофеля и льна-долгунца в хозяйствах Центрального района Нечерноземной зоны РСФСР. ВНИИ организации производства, труда и управления в сельском хозяйстве, Москва.
- Евстропов, А. С., 2011. Компьютеризированная система мониторинга и анализа результативности применения инновационных технологий производства картофеля. Всероссийский научно-исследовательский институт механизации агрохимического обслуживания сельского хозяйства, Рязань.
- Зинченко, С. И., Григорьев, А. А., Антонов, С. М., Климова, Т. В., Безменко, А. А., 2012. Регистр технологий возделывания зерновых культур для условий опольной зоны Владимирской области. Владимирский НИИ сельского хозяйства, Владимир.
- Коледа, К. В., Дудук, А. А., Брукиш, Д. А., Бояр, Д. М., Витковский, Г. В., Емельянова, В. Н., Золотарь, А. К., 2010. Современные технологии возделывания сельскохозяйственных культур: рекомендации. ГГАУ, Гродно.
- Курганова, И. Н., 2010. Эмиссия и баланс диоксида углерода в наземных экосистемах России. URL: [http://www.sevin.ru/fundecology/msu\\_council/KurganovaIN-2010.pdf](http://www.sevin.ru/fundecology/msu_council/KurganovaIN-2010.pdf) (дата обращения: 07.05.2019).
- Левин, Ф. И., 1977. Количество растительных остатков в посевах полевых культур и его определение по урожаю основной продукции. Агрохимия 8, 36–42.
- Лукин, С. М., 2015. Эмиссия углекислого газа в агроценозах картофеля на дерново-подзолистой супесчаной почве. Владимирский земледелец 3–4 (74), 22–23.
- Люри, Д. И., Горячкин, С. В., Караваяева, Н. А., Денисенко, Е. А., Нефедова, Т. Г., 2010. Динамика сельскохозяйственных земель России в XX веке и постагрогенное восстановление растительности и почв. ГЕОС, Москва.
- Мазиров, И. М., Боротов, Б. Н., Лакеев, П. С., Щепелева, А. С., Васенев, И. И., 2015. Почвенные потоки углекислого газа в агроэкосистемах в условиях Московского региона. Земледелие 8, 17–19.
- Марковская, Г. К., Мельникова, Н. А., Нечаева, Е. Х., 2015. Биологическая активность чернозема обыкновенного при возделывании яровой пшеницы. Известия Самарской государственной сельскохозяйственной академии 4, 52–56.
- Назаренко, О. Г., Пашковская, Т. Г., Продан, В. И., Чеботникова, Е. А., 2011. Использование соломы в качестве удобрения. Рассвет, Ростов-на-Дону.
- Новиков, А. А., Кисаров, О. П., 2012. Обоснование роли корневых и пожнивных остатков в агроценозах. Научный журнал КубГАУ 78(04). URL: <http://ej.kubagro.ru/2012/04/pdf/36.pdf> (дата обращения: 08.05.2019).
- Пискунов, Е. Ю., 2012. Модификация коэффициента Тэйла. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/modifikatsiya-koeffitsienta-teyla> (дата обращения: 05.05.2019).
- Посыпанов, Г. С., Долгодворов, В. Е., Жеруков, Б. Х., 2007. Растениеводство. Колос, Москва.

- Сазонова, Д. Г., Китаев, А. Б., 2013. Использование модели «Гидрограф ГГИ-2001» для оценки притока воды в Камское водохранилище. Географический вестник 1(24), 52–71.
- Сапронов, Д. В., 2008. Многолетняя динамика эмиссии CO<sub>2</sub> из серых лесных и дерново-подзолистых почв. URL: <http://earthpapers.net/mnogoletnyaya-dinamika-emissii-co2-iz-seryh-lesnyh-i-derново-podzolistyh-rochv> (дата обращения: 08.05.2019).
- Суховеева, О. Э., 2016. Изменения климатических условий и агроклиматических ресурсов в Центральном районе Нечерноземной зоны. Вестник Воронежского государственного университета. Серия: География. Геоэкология 4, 41–49.
- Суховеева, О. Э., 2018. Приложение модели DNDC к оценке параметров углеродного и азотного обмена в пахотных почвах Нечерноземья. Известия Российской академии наук. Серия географическая 2, 74–85.
- Суховеева, О. Э., Курганова, И. Н., Лопес де Гереню, В. О., Сапронов, Д. В., 2018. Оценка дыхания агросерой лесной почвы с использованием методов статистического и имитационного моделирования. Ученые записки Крымского федерального университета им. В. И. Вернадского. География. Геология 1, 151–158.
- Типовые технологические карты возделывания и уборки колосовых культур / Столбушкин, Н. А., Жолобов, А. И., Дворцов, Е. Ф. (под ред.), 1984. Колос, Москва.
- Тэйл, Г., 1977. Экономические прогнозы и принятие решений. Статистика, Москва.
- Чертко, Н. К., Карпиченко, А. А., 2008. Математические методы в географии. БГУ, Минск.
- Чистотин, М. В., Сафонов, А. Ф., 2016. Динамика дыхания агродерново-подзолистой почвы в зависимости от содержания органического вещества и метеорологических факторов. Проблемы агрохимии и экологии 3, 52–58.
- Шевченко, В. А., 2002. Технология производства продукции растениеводства. Агропромиздат, Москва.
- Balashov, E., Buchkina, N., Rizhiya, E., Farkas, C. S., 2014. Field validation of DNDC and SWAP models for temperature and water content of loamy and sandy loam spodosols. International agrophysics 28(2), 133–142.
- Blagodatsky, S. A., Yevdokimov, I. V., Larionova, A. A., Richter, J., 1998. Microbial growth in soil and nitrogen turnover: model calibration with laboratory data. Soil Biology and Biochemistry 30(13), 1757–1764.
- Bolan, N. S., Saggiar, S., Luo, J., Bhandral, R., Singh, J., 2004. Gaseous Emissions of nitrogen from grazed pastures: processes, measurements and modeling, environmental implications, and mitigation, in: Sparks, D. L. Advances in agronomy. Elsevier, San Diego, 38–120.
- Cai, Z. T., Sawamoto, T., Li, C., Kang, G., Boonjawat, J., Mosier, A., Wassman, R., Tsuruta, H., 2003. Field validation of the DNDC model for greenhouse gas emission in East Asia cropping system. Global Biochemistry Cycles 17(4), 1107. <https://doi.org/10.1029/2003GB002046>
- Chen, C., Chen, D., Pan, J., Lam, S. K., 2013. Application of the denitrification-decomposition model to predict carbon dioxide emissions under alternative straw retention methods. Scientific World Journal 25, 851–901. <https://doi.org/10.1155/2013/851901>
- Frolking, S., Li, C., Braswell, R., Fuglestedt, J., 2004. Short- and long-term greenhouse gas and radiative forcing impacts of changing water management in Asian rice paddies. Global Change Biology 10(7), 1180–1196.
- Gifford, R. M., 1995. Whole plant respiration and photosynthesis of wheat under increased CO<sub>2</sub> concentration and temperature: long-term vs. short-term distinctions for modelling. Global Change Biology 1, 385–396.
- 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 200 years of DNDC (De Nitrification De Composition): Model evolution. Ecological modelling 292, 51–62.
- Giltrap, D. L., Li, C., Saggiar S., 2010. DNDC: a process-based model of greenhouse gas fluxes from agricultural soils. Agriculture, Ecosystems & Environment 136(3–4), 292–300.
- Guest, G., Kröbel, R., Grant, B., Smith, W., Sansoulet, J., Pattey, E., Desjardins, R., Jégo, G., Tremblay, N., Tremblay, G., 2017. Model comparison of soil processes in eastern Canada using Day Cent, DNDC and STICS. Nutrient Cycling in Agroecosystems 109(3), 211–232.
- Jain, A., Yang, X., Khesghi, H., McGuire, A. D., Post, W., Kicklighter, D., 2009. Nitrogen attenuation of terrestrial carbon cycle response to global environmental factors. Global Biogeochemistry Cycles 23, GB4028. <https://doi.org/10.1029/2009GB003474>

- Karelin D. V., Goryachkin S. V., Kudikov A. V., Lunin V. N., Dolgikh A. V., Lyuri D. I., Lopes de Gerenu V. O., 2017. Changes in carbon pool and CO<sub>2</sub> emission in the course of postagrogenic succession on gray soils (Luvic Phaeozems) in European Russia. *Eurasian Soil Science* 50 (5), 559–572. <https://doi.org/10.7868/80032180X17050070>
- Kurganova, I. N., Lopes de Gerenyu, V. O., Myakshina, T. N., Sapronov, D. V., Kuddeyarov, V. N., 2011. CO<sub>2</sub> emission from soils of various ecosystems of the Southern Taiga Zone: Data analysis of continuous 12-year monitoring. *Doklady Biological Sciences* 436(1), 56–58.
- Larionova, A. A., Kurganova, I. N., de Gerenyu, V. O. L., Zolotareva, B. N., Yevdokimov, I. V., Kuddeyarov, V. N., 2010. Carbon dioxide emissions from agrogray soils under climate changes. *Eurasian Soil Science* 43(2), 168–176.
- Larionova, A. A., Sapronov, D. V., Lopez de Gerenyu, V. O., Kuznetsova, L. G., Kuddeyarov, V. N., 2006. Contribution of plant root respiration to the CO<sub>2</sub> emission from soil. *Eurasian Soil Science* 39 (10), 1127–1135.
- Larionova A. A., Zolotareva B. N., Yevdokimov I. V., Bykhovets S. S., Buegger F., 2011. Identification of labile and stable pools of organic matter in an agrogray soil. *Eurasian Soil Science* 44(6), 628–640.
- Li, C., 2008. Modeling soil organic carbon sequestration potential with modeling approach. Simulation of Soil Organic Carbon Storage and Changes in Agricultural Cropland in China and Its Impact on Food Security. China Meteorological Press.
- Li, C., Frohking, S., Crocker, G. J., Grace, P. R., Klir, J., Korchens, M., Poulton, P. R., 1997. Simulating trends in soil organic carbon in long-term experiments using the DNDC model. *Geoderma* 81, 45–60.
- Li, C., Frohking, S., Frohking, T. A., 1992. A model of nitrous oxide evolution from soil driven by rainfall events: 1. Model structure and sensitivity. *Journal of geophysical research* 97(D9), 9759–9776.
- Li, C., Frohking, S., Xiao, X., Moore, III B., Boles, S., Qiu, J., Huang, Y., Salas, W., Sass, R., 2005. Modeling impacts of farming management alternatives on CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, and N<sub>2</sub>O emissions: A case study for water management of rice agriculture of China. *Global Biogeochemical Cycles* 19 (3), GB3010. <https://doi.org/10.1029/2004GB002341>
- Luo, Y., Zhou, X., 2006. Soil respiration and the environment, Burlington, Academic Press.
- Nash, J. E., Sutcliffe, J. V., 1970. River flow forecasting through conceptual models. Pt I — A discussion of principles. *Journal of hydrology* 10(3), 282–290.
- Pathak, H., Li, C., Wassmann, R., 2005. Greenhouse gas emissions from India rice fields: calibration and upscaling using the DNDC model. *Bio Geosciences* 2(2), 113–123.
- Scurlock, J. M. O., Cramer, W., Olson, R. J., Parton, W. J., Prince, S. D., 1999. Terrestrial NPP: Toward a consistent data set for global model evaluation. *Ecological Application* 9, 913–919.
- Shamseldin, A. Y., O'Connor, K. M., 2001. A non-linear neural network technique for updating of river flow forecast. *Hydrology and Earth system science* 5(4), 577–597.
- Sokolov, A. P., Kicklighter, D. W., Melillo, J. M., Felzer, B. S., Schlosser, C. A., Cronin, T. W., 2008. Consequences of considering carbon-nitrogen interactions on the feedbacks between climate and the terrestrial carbon cycle. *Journal of Climate* 21(15), 3776–3796.
- Thornton, P. E., Doney, S. C., Lindsay, K., Moore, J. K., Mahowald, N., Randerson, J. T., Fung, I., Lamarque, J. F., Feddesma, J. J., Lee, Y. H., 2009. Carbon-nitrogen interactions regulate climate—carbon cycle feedbacks: results from an atmosphere — ocean general circulation model. *Bio Geosciences* 6, 2099–2120.
- Yadav, D., Wang, J., 2017. Modelling carbon dioxide emissions from agricultural soils in Canada. *Environmental Pollution* 230, 1040–1049. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2017.07.066>
- Yu, Y., Zhao, C., 2015. Modelling soil and root respiration in a cotton field using the DNDC model. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* 178(5), 787–791.

Статья поступила в редакцию 13 сентября 2018 г.

Статья рекомендована в печать 18 марта 2019 г.

#### Контактная информация:

Суховеева Ольга Эдуардовна — [olgasukhoveeva@gmail.com](mailto:olgasukhoveeva@gmail.com)

Карелин Дмитрий Витальевич — [dkarelin7@gmail.com](mailto:dkarelin7@gmail.com)

# Parametrization of the model DNDC for evaluating components of carbon biogeochemical cycle in the European part of Russia

O. E. Sukhoveeva<sup>1</sup>, D. V. Karelin<sup>1, 2</sup>

<sup>1</sup> Institute of Geography, Russian Academy of Sciences,  
29, Staromonetny per., Moscow, 119017, Russian Federation

<sup>2</sup> Center for Problems of Ecology and Productivity of Forests,  
Russian Academy of Sciences,  
84/32, Profsoyuznaya ul., Moscow, 117997, Russian Federation

**For citation:** Sukhoveeva, O. E., Karelin, D. V. (2019). Parametrization of the model DNDC for evaluating components of carbon biogeochemical cycle in the European part of Russia. *Vestnik of Saint Petersburg University. Earth Sciences*, 64(2), 363–384. <https://doi.org/10.21638/spbu07.2019.211> (In Russian)

The aim of this research was to parameterize the simulation model DNDC (DeNitrification-DeComposition) to estimate components of the carbon biogeochemical cycle in arable soils of the European part of Russia. Methodological recommendations for DNDC use were developed on the basis of official statistical data, literature sources, as well as our results obtained earlier during initial approbation of the model. Principles of preparation of input information such as natural (climatic and soil conditions) and anthropogenic (tillage, fertilization, crops yield) factors were established. Internal parameters of the model including soil characteristics (depth of top soil, C:N ratio, and soil organic carbon fractions) and crops biology (heat and water demand, C:N ratio, and biomass fractions) were corrected; also a standardized description of the main cultivation technologies was developed in the model's format. A method for evaluation of modelling efficiency was offered; it is a complex consisting of five criteria: the Nash-Sutcliffe coefficient, the Theil coefficient, the Pearson correlation coefficient, ANOVA, and the F-test of equality of variance. For verification of the adapted model DNDC to Russian conditions, data of two field experiments aimed at measuring CO<sub>2</sub> emissions in Kursk and Moscow regions were used, as well as published information about CO<sub>2</sub> emission and carbon balance in arable soils in Kursk, Moscow, Orel, Samara, and Vladimir regions. At the step of verification, the accuracy of obtained results was confirmed by a set of relevant statistical criteria: there was medium correlation between experimental values of CO<sub>2</sub> emission and modelled ones; as results of ANOVA showed, the average measured value of emission and the calculated one are similar; Theil coefficients less than 0.3 and positive Nash-Sutcliffe coefficients confirmed the correctness of changes inputted into the model. It was proved that the developed parametrization method is effective for estimating components of carbon biogeochemical cycle in the European part of Russia.

**Keywords:** arable soils, carbon biogeochemical cycle, carbon dioxide emission, European part of Russian, model DNDC.

## References

- Alyabina, I. O., Androhanov, V. A., Vershinin, V. V., Volkov, S. N., Ganzhara, N. F., Dobrovol'skij, G. V., Ivanov, A. V., Ivanov, A. L., Ivanova, E. A., Il'in, L. I., Karpachevskij, M. L., Kashtanov, A. N., Kiryushin, V. I., Kolesnikova, V. M., Kolesnikova, L. G., Lojko, P. F., Manylov, I. E., Marechek, M. S., Mahinova, A. F., Molchanov, E. N., Prohorov, A. N., Pyagaj, E. T., Rozhkov, V. A., Rybal'skij, N. N., Savin, I. Yu., Samojlova, N. S., Sapozhnikov, P. M., Sizov, V. V., Stolbovoj, V. S., Suhanov, P. A., Urusevskaya, I. S., Chochaev, A. H., Sheremet, B. V., Shoba, S. A., Yakovlev, A. S., 2014. Edinyi gosudarstvennyi reestr pochvennykh resursov Rossii. Versiia 1.0 [Unified state register of soil recourses of Russia. Version 1.0]. Pochvennyi institut V. V. Dokuchaeva Rossel'khozakademii Publ., Moscow. (In Russian)
- Alferov, A. M., Blinov, V. G., Gitarskiy, M. L., Grabar, V. A., Zamolodchikov, D. G., Zinchenko, A. V., Ivanova, N. P., Ivakhov, V. M., Karaban', R. T., Karelin, D. V., Kalyuzhnyy, I. L., Kashin, F. V., Konyushk-

- ov, D. Ye., Korotkov, V.N., Krovotyntsev, V.A., Lavrov, S.A., Marunich, A.S., Paramonova, N.N., Romanovskaya, A.A., Trunov, A.A., Shilkin, A.V., Yuzbekov, A.K., 2017. Monitoring potokov parnikovykh gazov v prirodnykh ekosistemakh [Monitoring of greenhouse gas flows in natural ecosystems]. Amirit Publ., Saratov.
- Balashov, E., Buchkina, N., Rizhiya, E., Farkas, C. S., 2014. Field validation of DNDC and SWAP models for temperature and water content of loamy and sandy loam spodosols. *International agrophysics* 28(2), 133–142.
- Blagodatsky, S. A., Yevdokimov, I. V., Larionova, A. A., Richter, J., 1998. Microbial growth in soil and nitrogen turnover: model calibration with laboratory data. *Soil Biology and Biochemistry* 30(13), 1757–1764.
- Bolan, N. S., Saggiar, S., Luo, J., Bhandral, R., Singh, J., 2004. Gaseous Emissions of nitrogen from grazed pastures: processes, measurements and modeling, environmental implications, and mitigation, in: Sparks, D. L. *Advances in agronomy*. Elsevier, San Diego, 38–120.
- Cai, Z. T., Sawamoto, T., Li, C., Kang, G., Boonjawat, J., Mosier, A., Wassman, R., Tsuruta, H., 2003. Field validation of the DNDC model for greenhouse gas emission in East Asia cropping system. *Global Biochemistry Cycles* 17(4), 1107. <https://doi.org/10.1029/2003GB002046>
- Chen, C., Chen, D., Pan, J., Lam, S. K., 2013. Application of the denitrification-decomposition model to predict carbon dioxide emissions under alternative straw retention methods. *Scientific World Journal* 25, 851–901. <https://doi.org/10.1155/2013/851901>
- Chertko, N.K., Karpichenko, A.A., 2008. *Matematicheskie metody v geografii* [Mathematical methods in geography]. BGU Publ., Minsk. (In Russian)
- Chistotin, M. V., Safonov, A. F., 2016. Dinamika dykhanii agrodernovo-podzolistoi pochvy v zavisimosti o tsoferzhaniia organicheskogo veshchestva i meteorologicheskikh faktorov [Temporal patterns of respiration of an agro-sod-podzolic soil as controlled by organic matter content and meteorological factors]. *Problemy agrokhimii i iekologii* 3, 52–58. (In Russian)
- Evsropov, A. S., 2011. Komp'yuterizirovannaya Sistema monitoring i analiza rezul'tativnosti primeneniia innovatsionnykh tekhnologii proizvodstva kartofelia [Computerized system of monitoring and analysis of applying effectiveness of innovative potato production technologies]. *Vserossiiskiy nauchno-issledovatel'skii institute mekhanizatsii agrokhimicheskogo obsluzhivaniia sel'skogo khoziaistva Publ., Riazan'*. (In Russian)
- Frolking, S., Li, C., Braswell, R., Fuglestedt, J., 2004. Short- and long-term greenhouse gas and radiative forcing impacts of changing water management in Asian rice paddies. *Global Change Biology* 10(7), 1180–1196.
- Gifford, R. M., 1995. Whole plant respiration and photosynthesis of wheat under increased CO<sub>2</sub> concentration and temperature: long-term vs. short-term distinctions for modelling. *Global Change Biology* 1, 385–396.
- 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 200 years of DNDC (DeNitrification DeComposition): Model evolution. *Ecological modelling* 292, 51–62.
- Giltrap, D. L., Li, C., Saggiar S., 2010. DNDC: a process-based model of greenhouse gas fluxes from agricultural soils. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 136(3–4), 292–300.
- Goncharova, O. Iu., Telesnina, V. M. 2010. *Biologicheskaya aktivnost' postagrogennykh pochv (na primere Moskovskoi oblasti)* [Biological activity of post-agrogenic soils (Moscow region)]. Moscow University Soil Science Bulletin 4, 26–33. (In Russian)
- Grachev, V. A., 1980. Tipovye tekhnologicheskie karty dlia planirovaniia i organizatsii proizvodstva zerna, kormov, kartofelia i l'na-dolguntsa v khoziaistvakh Tsentral'nogo raiona Nechernozemnoi zony RSFSR [Typical technical cards for planning and organization of producing grain, food, potato, and flax on the farms in Central Non-Chernozem zone RSFSR]. VNIi organizatsii proizvodstva, truda i upravleniia v sel'skom khoziaistve, Moscow. (In Russian)
- Guest, G. Kröbel, R. Grant, B. Smith, W. Sansoulet, J. Pattey, E. Desjardins, R. Jégo, G. Tremblay, N. Tremblay, G. 2017. Model comparison of soil processes in eastern Canada using DayCent, DNDC and STICS. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 109(3), 211–232.
- Jain, A., Yang, X., Khesghi, H., McGuire, A. D., Post, W., Kicklighter, D., 2009. Nitrogen attenuation of terrestrial carbon cycle response to global environmental factors. *Global Biogeochemistry Cycles* 23, GB4028. <https://doi.org/10.1029/2009GB003474>



- Karelin D. V., Goryachkin S. V., Kudikov A. V., Lunin V. N., Dolgikh A. V., Lyuri D. I., Lopes de Gerenyu V. O., 2017. Changes in carbon pool and CO<sub>2</sub> emission in the course of postagrogenic succession on gray soils (LuvicPhaeozems) in European Russia. *Eurasian Soil Science* 50 (5), 559–572. <https://doi.org/10.7868/80032180X17050070>
- Koleda, K. V., Duduk, A. A., Brukish, D. A., Boiar, D. M., Vitkovskii, G. V., Emel'ianova, V. N., Zolotar', A. K., 2010. Sovremennyye tekhnologii vozdel'yvaniya sel'skokhoziaistvennykh kul'tur: rekomendatsii [Modern technologies for growing crops: recommendations]. GGAU Publ., Grodno. (In Russian)
- Kurganova, I. N., Lopes de Gerenyu, V. O., Myakshina, T. N., Sapronov, D. V., Kuddeyarov, V. N., 2011. CO<sub>2</sub> emission from soils of various ecosystems of the Southern Taiga Zone: Data analysis of continuous 12-year monitoring. *Doklady Biological Sciences* 436(1), 56–58.
- Larionova, A. A., Kurganova, I. N., de Gerenyu, V. O. L., Zolotareva, B. N., Yevdokimov, I. V., Kuddeyarov, V. N., 2010. Carbon dioxide emissions from agrogray soils under climate changes. *Eurasian Soil Science* 43(2), 168–176.
- Larionova, A. A., Sapronov, D. V., Lopes de Gerenyu, V. O., Kuznetsova, L. G., Kuddeyarov, V. N., 2006. Contribution of plant root respiration to the CO<sub>2</sub> emission from soil. *Eurasian Soil Science* 39(10), 1127–1135.
- Larionova A. A., Zolotareva B. N., Yevdokimov I. V., Bykhovets S. S., Buegger F., 2011. Identification of labile and stable pools of organic matter in an agrogray soil. *Eurasian Soil Science* 44(6), 628–640.
- Levin, F. I., 1977. Kolichestvo rastitel'nykh ostatkov v posevakh polevykh kul'tur i ego opredelenie po urozhaiu osnovnoi produktsii [Quantity of plants residues in crop fields and its determination by yield the main production]. *Agrokhimia [Agricultural Chemistry]* 8, 36–42. (In Russian)
- Li, C., 2008. Modeling soil organic carbon sequestration potential with modeling approach. Simulation of Soil Organic Carbon Storage and Changes in Agricultural Cropland in China and Its Impact on Food Security. China Meteorological Press.
- Li, C., Frolking, S., Crocker, G. J., Grace, P. R., Klir, J., Korchens, M., Poulton, P. R., 1997. Simulating trends in soil organic carbon in long-term experiments using the DNDC model. *Geoderma* 81, 45–60.
- 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* 97(D9), 9759–9776.
- Li, C., Frolking, S., Xiao, X., Moore, III B., Boles, S., Qiu, J., Huang, Y., Salas, W., Sass, R., 2005. Modeling impacts of farming management alternatives on CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, and N<sub>2</sub>O emissions: A case study for water management of rice agriculture of China. *Global Biogeochemical Cycles* 19 (3), GB3010. <https://doi.org/10.1029/2004GB002341>
- Lukin, S. M., 2015. Emissiia uglekislogo gaza v agrotsenozakh kartofelia na dernovo-podzolistoi supeschnoi pochve [Carbon dioxide emission in potato agrocenosis on sod-podzolic sandy soils]. *Vladimirskii zemledelets [Vladimir farmer]* 3–4(74), 22–23. (In Russian)
- Luo, Y., Zhou, X., 2006. Soil respiration and the environment, Burlington, Academic Press.
- Markovskaia, G. K., Mel'nikova, N. A., Nechaeva, E. H., 2015. Biologicheskaiia aktivnost' chernozema obyknovennogo pri vozdel'yvanii iarovoi pshenitsy [Ordinary chernozem biological activity under spring wheat cultivation]. *Izvestiia Samarskoi gosudarstvennoi sel'skokhoziaistvennoi akademii [Samara State Agricultural Academy Bulletin]* 4, 52–56. (In Russian)
- Mazirov, I. M., Borotov, B. N., Lakeev, P. S., Shchepeleva, A. S., Vasenev, I. I., 2015. Pochvennye potoki uglekislogo gaza v agroekosistemakh v usloviakh Moskovskogo regiona [Soil flows of carbon dioxide in agro-ecosystems under conditions of Moscow region]. *Zemledelie* 8, 17–19. (In Russian)
- Nash, J. E., Sutcliffe, J. V., 1970. River flow forecasting through conceptual models. Pt I — A discussion of principles. *Journal of hydrology* 10(3), 282–290.
- Nazarenko, O. G., Pashkovskaia, T. G., Prodan, V. I., Chebotnikova, E. A., 2011. Ispolzovanie solomy v kachestve udobreniia [Using straw as a fertilize]. *Rassvet, Rostov-on-Don*. (In Russian)
- Novikov, A. A., Kisarov, O. P., 2012. Obosnovanie roli kornevykh i pozhnykh ostatkov v agrotsenozakh [Substantiation of role of shoot and root residues in agrocenosis]. *Nauchnyi zhurnal KubGAU* 78(04), URL: <http://ej.kubagro.ru/2012/04/pdf/36.pdf> (access date: 08.05.2019). (In Russian)
- Pathak, H., Li, C., Wassmann, R., 2005. Greenhouse gas emissions from India rice fields: calibration and upscaling using the DNDC model. *BioGeosciences* 2(2), 113–123.
- Piskunov, E. Iu., 2012. Modifikatsiia koeffitsienta Teila [Modification of Theil coefficient]. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/modifikatsiya-koeffitsienta-teyla> (access date: 05.05.2019). (In Russian).
- Posypanov, G. S., Dolgodvorov, V. E., Zherukov, B. H., 2007. Rasteniievodstvo [Cropping]. *Kolos Publ., Moscow*. (In Russian)

- Sapronov, D. V., 2008. Mnogoletniaia dinamika emissii CO<sub>2</sub> iz serykh lesnykh i dernovo-podzolistykh pochv [Long-term dynamics of CO<sub>2</sub> emission from grey forest and sod-podzolic soils]. URL: <http://earth-papers.net/mnogoletnyaya-dinamika-emissii-co2-iz-serykh-lesnykh-i-dernovo-podzolistykh-pochv> (access date: 08.05.2019). (In Russian)
- Sazonova, D. G., Kitaev, A. B., 2013. Ispol'zovanie modeli "Gidrograf GGI-2001" dlia otsenki pritoka vody v Kamskoe vodokhranilishche [Use of model "Hydrographer SHI-2001" for the estimation of inflow of water in Kama water basin]. *Geographical Bulletin* 1(24), 52–71. (In Russian).
- Scurlock, J. M. O., Cramer, W., Olson, R. J., Parton, W. J., Prince, S. D., 1999. Terrestrial NPP: Toward a consistent data set for global model evaluation. *Ecological Application* 9, 913–919.
- Shamseldin, A. Y., O'Connor, K. M., 2001. A non-linear neutral network technique for updating of river flow forecast. *Hydrology and Earth System Science* 5(4), 577–597.
- Shevchenko, V. A., 2002. Tekhnologiya proizvodstva produktsii rastenievodstva [Technology of producing crop production]. Agropromizdat Publ., Moscow. (In Russian)
- Sokolov, A. P., Kicklighter, D. W., Melillo, J. M., Felzer, B. S., Schlosser, C. A., Cronin, T. W., 2008. Consequences of considering carbon-nitrogen interactions on the feedbacks between climate and the terrestrial carbon cycle. *Journal of Climate* 21(15), 3776–3796.
- Sukhoveeva, O. E., 2016. Izmeneniia klimaticheskikh uslovii i agroklimaticheskikh resursov v Tsentral'nom raione Nechernozemnoi zony [Changes of climatic conditions and agroklimatic resources in Central Non-black soil zone]. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta [Proceedings of Voronezh State University. Series: Geography. Geoecology]* 4, 41–49. (In Russian)
- Sukhoveeva, O. E., 2018. Prilozhenie modeli DNDC k otsenke parametrov uglerodnogo i azotnogo obmena v pakhotnykh pochvakh Nechernozem'ia [Application of the DNDC model for estimation of carbon and exchange parameters in arable soil in Non-Chernozem Zone]. *Izvestiia RAN. Seriya geograficheskaya [Izvestiya RAN (Akad. Nauk SSSR). Series Geograficheskaya]* 2, 74–85. (In Russian)
- Sukhoveeva, O. E., Kurganova, I. N., Lopes de Gereniu, V. O., Sapronov, D. V., 2018. Otsenka dykhaniiy agroserei lesnoi pochvy s ispol'zovaniem metodov statisticheskogo i imitatsionnogo modelirovaniia [The evaluation of agrogrey forest soil respiration by statistical and simulation modelling approaches]. *Uchenye zapiski Krymskogo federal'nogo universiteta im. V.I. Vernadskogo. Geografiia. Geologiya* 1, 155–162. (In Russian)
- Theil, G., 1977. Ekonomicheskie prognozy i priniatie reshenii [Economical forecasts and decisionmaking]. Statistika, Moscow. (In Russian).
- Thornton, P. E., Doney, S. C., Lindsay, K., Moore, J. K., Mahowald, N., Randerson, J. T., Fung, I., Lamarque, J. F., Feddesma, J. J., Lee, Y. H., 2009. Carbon-nitrogen interactions regulate climate—carbon cycle feedbacks: results from an atmosphere—ocean general circulation model. *BioGeosciences* 6, 2099–2120.
- Tipovye tekhnologicheskie karty vozdelevaniia i uborki kolosovykh kul'tur, 1984 [Typical technological cards of cultivation and harvesting grain crops]. Kolos Publ., Moscow. (In Russian)
- Yadav, D., Wang, J., 2017. Modelling carbon dioxide emissions from agricultural soils in Canada. *Environmental Pollution* 230, 1040–1049. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2017.07.066>
- Yu, Y., Zhao, C., 2015. Modelling soil and root respiration in a cotton field using the DNDC model. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* 178(5), 787–791.
- Zinchenko, S. I., Grigor'ev, A. A., Antonov, S. M., Klimova, T. V., Bezmenko, A. A., 2012. Registr tekhnologii vozdelevaniia zernovykh kul'tur dlia uslovii opol'noi zony Vladimirskoi oblasti [Register of technologies of grain crops cultivation under landslide zone conditions in Vladimir region]. *Vladimirskiy NII sel'skogo khozyaystva, Vladimir*. (In Russian)

Received: September 13, 2018

Accepted: March 18, 2019

#### Author's information:

Olga E. Sukhoveeva — [olgasukhoveeva@gmail.com](mailto:olgasukhoveeva@gmail.com)  
 Dmitry V. Karelin — [dkarelin7@gmail.com](mailto:dkarelin7@gmail.com)