

РЕГИОНАЛЬНЫЕ
ГЕОГРАФИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ

УДК 004.942:550.47:631.417.1:631.417.4

ВЕРИФИКАЦИЯ МОДЕЛИ DNDC ДЛЯ ОЦЕНКИ УГЛЕРОДНОГО
И АЗОТНОГО ОБМЕНА В ПАХОТНЫХ ПОЧВАХ НЕЧЕРНОЗЕМЬЯ

© 2018 г. О. Э. Суховеева

Институт географии РАН, Москва, Россия

e-mail: olgasukhoveeva@gmail.com

Поступила в редакцию 19.09.2016 г.

Принята в печать 22.03.2018 г.

Проведена апробация модели DNDC (DeNitrification-DeComposition) с целью оценки возможности ее использования для анализа углеродного и азотного обмена и динамики парниковых газов в агроэкосистемах пахотных почв Центрального района Нечерноземной зоны России. Верификация модели на основе литературных данных показала, что для нечерноземных пахотных почв DNDC, как правило, не превышает значения компонентов биогеохимического цикла углерода, в том числе эмиссию диоксида углерода. Несоответствие моделируемых и полевых опытных данных отмечено для выноса культурами и вымывания азота при внесении удобрений. Представлена методика верификации на основе расчета содержания углерода в растительной биомассе. DNDC в наибольшей степени подходит для работы с яровыми зерновыми культурами, хотя вегетативную биомассу она чаще занижает по сравнению с расчетной.

Ключевые слова: модель DNDC, верификация модели, биогеохимические циклы азота и углерода, парниковые газы, углекислый газ, метан, закись азота, агроэкосистемы

DOI: 10.1134/S2587556618040155

Введение. Статья является продолжением публикации, посвященной исследованию возможности использования модели DNDC (DeNitrification-DeComposition) для анализа биогеохимических циклов азота (N) и углерода (C) и динамики парниковых газов в агроэкосистемах пахотных почв Центрального района Нечерноземной зоны России.

На сегодняшний день разработано множество моделей почвенных процессов, которые позволяют оценить динамику веществ в системе “почва–растение–атмосфера”, акцентируя внимание на циклах азота, углерода и других макроэлементов, а также расчете эмиссии парниковых газов. Используемая в настоящем исследовании модель DNDC входит в 30 важнейших моделей почвенных процессов по данным International Soil Modeling Consortium [18], наряду с AgroC, APEX, CANDY, CNMM, COP-Soil, CoupModel, DAISY, DEMENT, DIDAS, ECOSSE, EPIC, Expect-N, Hydrus, MAD#, MONICA, MOSAIC, MOTOR, RootBox, RothC, R-SWMS, Saltirsoil M, SiSPAT-Isotope, SoilGen, SPACSYS, SPOTPY, STANMOD, SWAP, VSoil Platform и WAVE.

Включение цикла азота (прежде всего, его поступления из антропогенных источников) в климатические и почвенные модели позволило сделать вывод о значительно меньшем – на 20–50%

[15] и даже 53–78% [22] – поглощении диоксида углерода (CO₂) наземными экосистемами по сравнению с моделями, не учитывающими углерод-азотные взаимодействия [16, 19]. Поскольку DNDC включает в себя такие взаимосвязи, это дает ей преимущество в одновременной оценке биогеохимических циклов азота (субмодель Denitrification) и углерода (субмодель Decomposition), а также термических и гидрологических условий в различных типах агроэкосистем. Также немаловажен тот факт, что DNDC находится в свободном доступе.

В последние годы модель DNDC, ранее широко используемая за рубежом, начала применяться в России. Работы были посвящены оценке эмиссии закиси азота (N₂O) из почвы, занятой овощными культурами [12, 13], и эмиссии CO₂ из верховых болот [20]. Но в настоящей работе впервые исследуется возможность применения DNDC для расчета эмиссии трех важнейших парниковых газов из пахотных почв при возделывании полевых культур на территории Нечерноземной зоны РФ.

В задачи второго этапа исследования входила верификация модели DNDC, т.е. оценка адекватности представляемых ею результатов для рассматриваемого региона.

Методика исследований. При верификации модели реализовывалось два подхода: по компонентам биогеохимических циклов N и C на основе данных опубликованных работ и по растительной биомассе на базе оценки содержания углерода по методу Левина [6]. Содержание углерода в растительной биомассе принималось равным 45% на сухое вещество.

В данных литературы наиболее подробно рассмотрены такие компоненты биогеохимических циклов элементов в пахотных почвах, как эмиссия CO₂ и баланс углерода, выщелачивание и вынос сельскохозяйственными культурами азота, которые и были выбраны для первого этапа верификации DNDC. В рамках этого подхода основное внимание было уделено тому, чтобы максимально точно воспроизвести измеренные на опытных полях значения показателей, являющихся независимыми переменными модели, т.е. специфические характеристики почвы, метеорологические условия конкретных лет и прочие данные, представленные в опубликованных статьях (табл. 1). При отсутствии в статье конкретных данных использовались средние показатели, описанные выше. Или, как в случае с отсутствием метеоданных в открытом доступе, использовались данные соседних областей (например, метеопараметры Московской области вместо Владимирской).

Верификация по содержанию углерода в биомассе сельскохозяйственных культур (рис. 1) проводилась также на примере Московской области. Культуры были выбраны те же, которые встречались в блоке верификации по литературным источникам: озимая пшеница, ячмень, картофель, чтобы была возможность дополнительно сравнить полученные параметры. Урожайности определялись на основе сведений Росстата [3] за 1995–2014 гг. Метеорологические условия и дозы вносимых удобрений вводились за каждый соответствующий год по данным ВНИИ ГМИ-МЦД [11] и Росстата [2] соответственно. Полученная урожайность принималась за основную продукцию, стебли и листья, отчуждаемые с поля, – за побочную, стерня – за поверхностные растительные остатки, также выделялась фракция корней. При этом их доля в общей биомассе указывается пользователем, а модель затем самостоятельно рассчитывает соотношение, в том числе урожайность и количество поступающих в почву растительных остатков.

Сравнение смоделированных и наблюдаемых значений проводилось графическим методом и с помощью расчета коэффициента корреляции Пирсона.

Результаты исследований. При сравнении результатов моделирования с опубликованными экспериментальными данными было отмечено

соответствие некоторых расчетных и полученных в полевых опытах показателей, однако в ряде других сравнений разница между реальными и расчетными значениями была достаточно велика (см. табл. 1). Так, результаты полевых измерений лежали внутри диапазона полученных расчетных значений при моделировании баланса C в зернопаровом севообороте, оценке эмиссии CO₂ и баланса C в агроценозах картофеля при применении удобрений, а также при оценке выноса N картофелем и вымывания N при выращивании озимой пшеницы и картофеля без удобрений.

Модельные значения выноса N пшеницей и свеклой, баланса C и эмиссии CO₂ в агроценозах картофеля без удобрений, эмиссии C в зернопаровом севообороте были существенно ниже полевых. И, наоборот, в случаях поступления N в почву с атмосферными осадками и вымывания этого элемента в агроценозах пшеницы и картофеля с применением удобрений, модельные значения превышали опытные.

Наиболее значимые несоответствия между модельными и полученными в экспериментальных исследованиях величинами были отмечены для субмодели азота. Так, среднее вымывание N при выращивании пшеницы и картофеля в условиях внесения удобрений превышает реальные показатели в 20 и 13 раз соответственно. Моделируемый вынос N озимой пшеницей и кормовой свеклой, наоборот, ниже наблюдаемого в 2 и 3 раза соответственно.

Другой подход к верификации состоял в проверке результатов модели на основе данных по содержанию C в биомассе сельскохозяйственных культур, рассчитанного по их средней урожайности в Московской области за 1995–2014 гг. Его результаты представлены на рисунке.

Следует отметить различия между подходами к оценке фракций биомассы, используемыми в модели DNDC и в расчетном методе Левина. Так, DNDC в общей биомассе выделяет зерно, стебли, листья, корни и отдельно пожнивные остатки. В методе Левина биомасса делится на основную продукцию, побочную, надземные и корневые растительные остатки. В настоящем исследовании фракции идентифицировались следующим образом: зерно отождествлялось с основной продукцией, совокупность стеблей и листьев – с побочной продукцией, корни и стерня – с корневыми и надземными остатками соответственно.

При сопоставлении ранжированных по возрасту графиков на рисунке можно отметить, что модель занижает количество надземных (стерни) и корневых растительных остатков у всех трех рассматриваемых культур. И наоборот, завышает надземную часть (или побочную продукцию) картофеля, хотя у озимой пшеницы этот модельный показатель ниже урожайностного.

Таблица 1. Сопоставление данных моделирования с результатами полевых измерений (верификация модели DNDC по литературным источникам)

Параметры	Значение, полученное при моделировании	Полевые опытные данные				Ссылка
		Значение	Регион	Период	Почва	
Цикл С в зернопаровом севообороте, кг С/га						
• Эмиссия CO ₂	1119.7–1185.7	3304	Московская обл., г. Пушкино, Опытная станция ИФХиБПП РАН	2000–2004 гг.	Серая лесная тяжелосуглинистая	[10]
• Баланс С	162.6–277.7	250				
Эмиссия CO ₂ в агроценозах картофеля, кг С/га						
• Без удобрений	427–800	1753	Владимирская обл., Судогодский р-н, Длительный стационарный опыт ВНИИОУ	2004–2014 гг.	Дерново-подзолистая супесчаная, глееватая	[7]
• С удобрениями	1307–4074	3019				
Баланс С в агроценозах картофеля, кг С/га	–247.6...–558.0					
• Без удобрений	+4987.9...+6111.0	–1004				
• С удобрениями		+6016				
Поступление N с атмосферными осадками, кг N/га	4.4–8.3	3.3–4.3				
Выщелачивание N, кг N/га						
• Озимая пшеница, без удобрений	0.4–0.8	0.6–0.9	Московская обл., Подольский р-н, опытное хозяйство ВИЖа “Щапово”	1966–1968 гг.	Дерново-слабоподзолистая, среднесуглинистая на покровном тяжелом суглинке	[4]
• Озимая пшеница, с удобрениями	4.3–36.7	0.9–1.1				
• Картофель, без удобрений	0.7–2.7	1.6–2.6				
• Картофель, с удобрениями	17.1–52.7	1.9–3.4				
Вынос N, кг N/га						
• Озимая пшеница	33.1–51.1	68.7–114.3				
• Картофель	24.7–68.6	61.4	Владимирская обл.	Нет данных	Дерново-подзолистая легкосупесчаная слабоглееватая	[8]
• Кормовая свекла	18.2–104.1	190–214	г. Москва, Опытная станция РГАУ-МСХА	Нет данных	Дерново-подзолистая среднесуглинистая	[5]

Следует отметить практически полное совпадение оценок углерода в вегетативной массе (стебли + листья) ячменя, полученных DNDC и основанных на урожайности (коэффициент корреляции Пирсона $r = 0.97, p = 0.0025$).

Параллельно были определены корреляции между моделируемыми и наблюдаемыми величинами фракций растительной биомассы трех культур. Высокие коэффициенты корреляции были получены для вегетативной и корневой биомасс озимой пшеницы ($r = 0.80, p = 0.0002$ и $r = 0.82, p = 0$ соответственно) и ячменя ($r = 0.99, p = 0.0025$ и $r = 0.95, p = 0.0385$ соответственно), для пожнивных остатков ячменя ($r = 0.90, p = 0$) и кар-

тофеля ($r = 0.69, p = 0$), а также для надземной и подземной биомассы последнего ($r = 0.56, p = 0$). Низкие корреляции между моделируемыми и расчетными величинами ($r < 0.10$) наблюдаются по основной продукции всех трех культур.

В рамках настоящего исследования наибольший интерес представляют надземные и корневые растительные остатки, поскольку после окончания вегетации культуры они непосредственно включаются в биогеохимический цикл углерода в почве. Модель хоть и занижает эти параметры, но в целом корректно откликается на изменение внешних условий, что подтверждается высокими корреляциями между модельными и

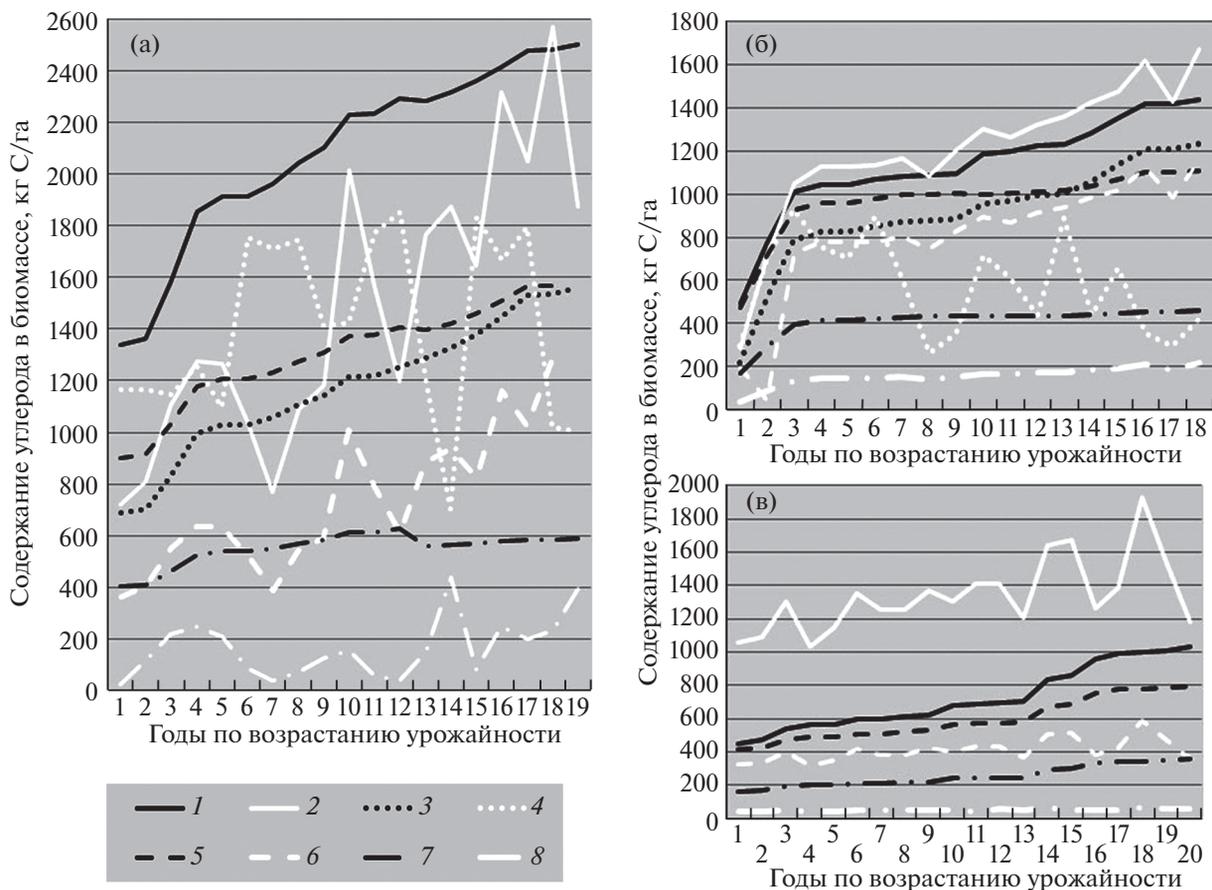


Рис. 1. Верификация модели DNDC по содержанию углерода в биомассе сельскохозяйственных культур: (а) озимая пшеница, (б) ячмень, (в) картофель. 1 – побочная продукция реальная, 2 – побочная продукция моделируемая, 3 – основная продукция реальная, 4 – основная продукция моделируемая, 5 – корневая биомасса реальная, 6 – корневая биомасса моделируемая, 7 – пожнивные остатки реальные, 8 – пожнивные остатки моделируемые.

наблюдаемыми показателями для стерни картофеля и ячменя, корней озимой пшеницы и ячменя, численные значения которых представлены выше. Таким образом, несмотря на несовпадение численных значений, результаты моделирования отражают закономерности формирования и поступления в почву растительной биомассы и сопоставимы с реальными компонентами биогеохимического цикла углерода.

Обсуждение результатов. В настоящем исследовании было получено, что прогнозируемые моделью параметры могут как превышать, так и занижать наблюдаемые значения. Тем не менее модель дает возможность оценить и предсказать баланс С и эмиссию CO_2 , а также вымывание N при возделывании культур. Отмеченные при проведении верификации расхождения могут быть также вызваны самим характером входных данных моделирования, в частности, искажения могут вызвать применяемый в официальной статистике метод осреднения данных.

В работах зарубежных авторов были отмечены случаи очень точного расчета на основе DNDC. Так, разница между рассчитанными моделью и измеренными в длительных полевых опытах значениями органического С в почвах на 8 участках пашни и 3 сенокосах, расположенных в Европе и Австралии, не превышала 0.7% [21].

По оценке [14], прогнозы эмиссии N_2O в северной части Бельгии на основе DNDC (версия 8.3) значительно лучше согласовались с результатами полевых наблюдений на пахотных почвах по сравнению с пастбищами, кроме того, DNDC значительно точнее прогнозировала эмиссию закиси азота, чем модели, разработанные ранее и базирующиеся на применении простых регрессионных уравнений.

В работе [1] отмечено, что в посевах ярового ячменя на супесчаных подзолах в Ленинградской области модель адекватно отражала влияние разных доз азотных удобрений на кумулятивные потоки N_2O , но переоценивала их по сравнению с наблюдаемыми. В более поздней работе [12] в тех

же условиях северо-запада России было определено, что DNDC по сравнению с моделью SWAP лучше предсказывала содержание почвенной влаги, учитывая при этом изменения суточного количества осадков, но проигрывала в точности прогноза сезонной динамики температур почвы.

Следует отметить, что при расчете эмиссии N₂O на сенокосах южной Ирландии с преобладанием райграса модель превышала реальные параметры на 32%, тогда как выбросы неантропогенного происхождения (фоновые) были предсказаны ею в размере лишь 15% от наблюдаемых [17]. В работе [23] также отмечается, что DNDC (версия 7.2) существенно занижала оценку эмиссии N₂O, и на пастбищах северного Китая моделируемая годовая эмиссия N₂O была на 40% ниже результатов, полученных в полевых измерениях.

В настоящем исследовании на основе моделирования было подтверждено преобладание в нечерноземном регионе выброса CO₂ из пахотных почв по сравнению с эмиссией CH₄ и N₂O, отмеченное в Национальном кадастре антропогенных выбросов и сорбции парниковых газов [9].

Подход к верификации модели на основе расчета фракций биомассы и содержания углерода в ней фактически проведен нами впервые, что исключает возможность сравнить полученные данные с результатами других исследователей.

Заключение. При сопоставлении с данными литературы было выяснено, что для нечерноземных пахотных почв DNDC, как правило, не завышает значения компонентов биогеохимического цикла углерода, в том числе эмиссию диоксида углерода: моделируемые значения совпадают, или ниже наблюдаемых. Хотя компоненты биогеохимического цикла азота при моделировании с помощью DNDC в Нечерноземье могут значительно отличаться от наблюдаемых.

Верификация по содержанию углерода в различных фракциях растительной биомассы показала, что модель наилучшим образом подходит для работы с яровыми зерновыми культурами. У злаков биомасса пожнивных и корневых остатков занижается моделью, однако отличается значимыми коэффициентами корреляции с расчетными величинами, что свидетельствует о корректном отражении моделью закономерностей формирования и поступления в почву растительной биомассы и адекватном расчете элементов биогеохимического цикла углерода в почве.

Благодарности. Работа выполнена в рамках темы фундаментальных научных исследований 0148-2014-0005 “Решение фундаментальных проблем анализа и прогноза состояния климатической системы Земли”. Рег. № 01201352499.

Автор выражает благодарность чл.-корр. Романовской Анне Анатольевне за научное консультирование при выполнении исследования.

Acknowledgments. This work was done within framework of Basic Scientific Research Theme no. 0148-2014-0005 “Solution of fundamental problems of analysis and forecast of Earth climatic system condition” (no. 01201352499).

Author is grateful to Dr. Sci. (Biol.) A.A. Romanovskaya for scientific consultations during the research.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Балашов Е.В., Бучкина Н.П., Рижия Е.Я., Павлик С.В.* Прямые измерения и прогноз эмиссии закиси азота из почв с помощью модели DNDC // Снижение отрицательного воздействия на окружающую среду химически активного азота при производстве сельскохозяйственной продукции. СПб: Ин-т агроинженерных и экологических проблем сельскохозяйственного производства, 2010. С. 60–68.
2. Внесение удобрений под урожай 1990–2014 гг. и проведение работ по химической мелиорации земель. М.: Росстат, ГМЦ, 1991–2015. 64 с.
3. Единая межведомственная информационно-статистическая система (ЕМИСС). URL: <https://www.fedstat.ru/> (дата обращения: 06.06.2017).
4. *Иванов Ю.Д.* Динамика органического вещества и баланс азота в прифермских севооборотах и под бессменными культурами на дерново-слабоподзолистой почве: автореф. дис. ... канд. с.-х. наук. М.: ТСХА, 1969. 15 с.
5. *Кидин В.В., Гущина Е.О., Зенкина В.В.* Потребление разных форм азота кормовой свеклой и особенности его трансформации в почвенном профиле // Изв. ТСХА. 2009. Вып. 1. С. 5–12.
6. *Левин Ф.И.* Количество растительных остатков в посевах полевых культур и его определение по урожаю основной продукции // Агрехимия. 1977. № 8. С. 36–42.
7. *Лукин С.М.* Эмиссия углекислого газа в агроценозах картофеля на дерново-подзолистой супесчаной почве // Владимирский земледелец. 2015. № 3–4 (74). С. 22–23.
8. *Лукин С.М., Марчук Е.В.* Влияние биопрепаратов ассоциативных азотфиксирующих микроорганизмов на урожайность сельскохозяйственных культур // Достижения науки и техники АПК. 2011. № 8. С. 18–21.
9. Национальный доклад Российской Федерации о кадастре антропогенных выбросов из источников и абсорбции поглотителями парниковых газов, не регулируемых Монреальским протоколом за 1990–2013 гг. Ч. 1. М.: Росгидромет, 2015. 476 с.
10. *Сапронов Д.В.* Многолетняя динамика эмиссии CO₂ из серых лесных и дерново-подзолистых почв: автореф. дис. ... канд. биол. наук. Пушкино: ИФХиБПП РАН, 2008. 20 с.
11. Специализированные массивы для климатических исследований: Информация ВНИИГМИ-МЦД.

- URL: <http://aisori.meteo.ru/ClimateR> (дата обращения: 06.06.2017).
12. Balashov E., Buchkina N., Rizhiya E., Farkas C.S. Field validation of DNDC and SWAP models for temperature and water content of loamy and sandy loam spodosols // *International agrophysics*. 2014. V. 28. № 2. P. 133–142.
 13. Balashov E., Horak J., Siska B., Buchkina N., Rizhiya E., Pavlik S. N₂O fluxes from agricultural soils in Slovakia and Russia – direct measurements and prediction using the DNDC model // *Folia Oecologica*. 2010. V. 37. № 1. P. 8–15.
 14. Beheydt D., Boeckx P., Li C., van Cleemput O. Validation of DNDC for 22 long-term N₂O field emission measurements // *Atmospheric Environment*. 2007. V. 41. № 29. P. 6196–6211.
 15. Elzen M.G.J., Beusen A.H.W., Rotmans J. An integrated modeling approach to global carbon and nitrogen cycles: Balancing their budgets // *Global biogeochemical cycles*. 1997. V. 11. № 2. P. 191–215.
 16. Gerber S., Hedin L.O., Oppenheimer M., Pacala S.W., Shevliakova E. Nitrogen cycling and feedbacks in a global dynamic land model // *Global Biogeochemistry Cycles*. 2010. V. 24. GB1001.
 17. Hsieh C.-I., Leahy P., Kiely G., Li C. The effect of future climate perturbations on N₂O emissions from a fertilized humid grassland // *Nutrient Cycling in Agroecosystems*. 2005. V. 73. № 1. P. 15–23.
 18. International Soil Modeling Consortium (ISMC). URL: https://soil-modeling.org/copy_of_models (дата обращения: 06.06.2017).
 19. Jain A., Yang X., Kleshgi H., McGuire A.D., Post W., Kicklighter D. Nitrogen attenuation of terrestrial carbon cycle response to global environmental factors // *Global Biogeochemistry Cycles*. 2009. № 23. GB4028.
 20. Kurbatova J., Tatarinov F., Varlagin A., Shalukhina N., Olchev A., Li C. Modeling of the carbon dioxide fluxes in European Russia peat bogs // *Environmental Research Letters*. 2009. V. 4. № 4. P. 045022.
 21. Li C., Frolking S., Crocker G.J., Grace P.R., Klir J., Korchens M., Poulton P.R. Simulating trends in soil organic carbon in long-term experiments using the DNDC model // *Geoderma*. 1997. № 81. P. 45–60.
 22. Thornton P.E., Doney S.C., Lindsay K., Moore J.K., Mahowald N., Randerson J.T., Fung I., Lamarque J.-F., Feddes J.J., Lee Y.-H. Carbon-nitrogen interactions regulate climate–carbon cycle feedbacks: results from an atmosphere–ocean general circulation model // *Biogeosciences*. 2009. № 6. P. 2099–2120.
 23. Wang M., Wang Y. Using a modified DNDC model to estimate N₂O fluxes from semi-arid grassland in China // *Soil biology and biochemistry*. 2003. V. 35. № 4. P. 615–620.

Verification of the DNDC model for estimation of carbon and nitrogen exchange parameters in arable soils in Central Non-Chernozem zone

O. E. Sukhoveeva

Institute of Geography, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

e-mail: olgasukhoveeva@gmail.com

Received September 19, 2016

Accepted March 22, 2018

The approbation of the DNDC (DeNitrification-DeComposition) model was done. The aim of research was to evaluate an opportunity of model using for analysis of carbon and nitrogen exchange and greenhouse gases dynamics in agroecosystems of arable soils in the Central Non-Chernozem zone in Russia. The verification of the model on the base of literature data detected that, as a rule, in arable Non-Chernozem soils modeled values of carbon biogeochemical cycle components and carbon dioxide emission are no higher than real ones. For nitrogen uptake by crops and nitrogen, leaching under fertilizing conditions, there was not conformity between modeled results and field experiments data. The method of verification on the base of carbon content in crop biomass calculation was presented. DNDC is good for spring grain crops modeling, but often the values of plant biomass are decreased by model plant biomass.

Keywords: DNDC model, model verification, carbon and nitrogen biogeochemical cycles, greenhouse gases, carbon dioxide, methane, nitrous oxide, agroecosystems.

REFERENCES

1. Balashov E.V., Buchkina N.P., Rizhiya E.J., and Pavlik S.V. Direct measurements and forecast of nitrous oxide emissions from soils using the DNDC model. In *Snizhenie otritsatel'nogo vozdeistviya na okruzhayushchuyu sredu khimicheskoi aktivnogo azota pri proizvodstve sel'skokhozyaystvennoi produktsii* [Decreasing of Negative Influence of Chemically Reactive Nitrogen on Environment During Agricultural Production]. St. Petersburg: IAE PAP Publ., 2010, pp. 60–68. (In Russ.).
2. *Vnesenie udobrenii pod urozhai 1990–2014 gg. i provedenie rabot po khimicheskoi melioratsii zemel'* [Fertilizers Input for Yields 1990–2014 and Implementation of Chemical Melioration]. Moscow: Rosstat Publ., 1991–2015. 64 p.
3. *Edinaya mezhvedomstvennaya informatsionno – statisticheskaya sistema* [Federal State Statistics Service].

- Available at: <https://www.fedstat.ru/> (accessed 12.05.2018).
4. Ivanov Y.D. Dynamics of organic matter and nitrogen balance for by-farm crop rotation and permanent crops in sod-podzolic soil. Extended Abstract of Cand. Sci. (Agricult.) Dissertation. Moscow: МТАА Publ., 1969. 15 p.
 5. Kidin V.V., Gustchina E.O., and Zenkina V.V. Ammonium and nitrate nitrogen used by fodder beet, nitrogen transformations in various horizons of sod-podzolic soil. *Izv. of Timiryazev Agricultural Academy*, 2009, no. 1, pp. 5–12. (In Russ.).
 6. Levin F.I. Amount of plant residues of field crops and its definition by yield of the main products. *Agricultural Chemistry*, 1977, no. 8, pp. 36–42. (In Russ.).
 7. Lukin S.M. Carbon dioxide emission in potato agrocenoses on sod-podzolic sandy loam soil. *Vladimirskii Zemledelets*, 2015, no. 3–4 (74), pp. 22–23. (In Russ.).
 8. Lukin S.M., and Marchuk E.V. Influence of biological preparations of associative nitrogen-fixing microorganisms on productivity of agricultural crops. *Dostizheniya nauki i tekhniki APK*, 2011, no. 8, pp. 18–21. (In Russ.).
 9. The National Report of the Russian Federation on the Inventory of the Anthropogenic Emissions and Sinks of Greenhouse Gases Not Controlled by the Montreal Protocol for the years 1990–2013. Moscow: Roshydromet Publ., 2015. 476 p.
 10. Sapronov D.V. Long-term dynamics of CO₂ emission from grey forest and sod-podzol soils. Extended Abstract of Cand. Sci. (Biol.) Dissertation. Pushchino, IFCBPS RAS, 2008. 20 p.
 11. *Spetsializirovannyye massivy dlya klimaticheskikh issledovaniy: Informatsia VNIIGMI-MCD* [Special Massifs for Climatic Research: Information of RIHMI-WDC]. Available at: <http://aisori.meteo.ru/ClimateR> (accessed 12.05.2018). (In Russ.).
 12. Balashov E., Buchkina N., Rizhiya E., and Farkas C.S. Field validation of DNDC and SWAP models for temperature and water content of loamy and sandy loam spodosols. *Int. Agrophys.*, 2014, vol. 28, no. 2, pp. 133–142.
 13. Balashov E., Horak J., Siska B., Buchkina N., Rizhiya E., and Pavlik S. N₂O fluxes from agricultural soils in Slovakia and Russia – direct measurements and prediction using the DNDC model. *Folia Oecologica*, 2010, vol. 37, no. 1, pp. 8–15.
 14. Beheydt D., Boeckx P., Li C., and van Cleemput O. Validation of DNDC for 22 long-term N₂O field emission measurements. *Atmos. Environ.*, 2007, vol. 41, no. 29, pp. 6196–6211.
 15. Elzen M.G.J., Beusen A.H.W., and Rotmans J. An integrated modeling approach to global carbon and nitrogen cycles: Balancing their budgets. *Global Biogeochem. Cy.*, 1997, vol. 11, no. 2, pp. 191–215.
 16. Gerber S., Hedin L.O., Oppenheimer M., Pacala S.W., Shevliakova E. Nitrogen cycling and feedbacks in a global dynamic land model. *Global Biogeochem. Cy.*, 2010, no. 24, GB1001.
 17. Hsieh C.-I., Leahy P., Kiely G., Li C. The effect of future climate perturbations on N₂O emissions from a fertilized humid grassland. *Nutr. Cycl. Agroecosys.*, 2005, vol. 73, no 1, pp. 15–23.
 18. International Soil Modeling Consortium (ISMC). Available at: https://soil-modeling.org/copy_of_models (accessed 12.05.2018).
 19. Jain A., Yang X., Khesghi H., McGuire A.D., Post W., Kicklighter D. Nitrogen attenuation of terrestrial carbon cycle response to global environmental factors. *Global Biogeochem. Cy.*, 2009, no. 23, pp. GB4028.
 20. Kurbatova J., Tatarinov F., Varlagin A., Shalukhina N., Olchev A., Li C. Modeling of the carbon dioxide fluxes in European Russia peat bogs. *Environ. Res. Lett.*, 2009, vol. 4, no. 4, pp. 045022.
 21. Li C., Frohling S., Crocker G.J., Grace P.R., Klir J., Korchens M., and Poulton P.R. Simulating trends in soil organic carbon in long-term experiments using the DNDC model. *Geoderma*, 1997, no. 81, pp. 45–60.
 22. Thornton P.E., Doney S.C., Lindsay K., Moore J.K., Mahowald N., Randerson J.T., Fung I., Lamarque J.-F., Feddes J.J., Lee Y.-H. Carbon-nitrogen interactions regulate climate–carbon cycle feedbacks: results from an atmosphere–ocean general circulation model. *Biogeosciences*, 2009, no. 6, pp. 2099–2120.
 23. Wang M. and Wang Y. Using a modified DNDC model to estimate N₂O fluxes from semi-arid grassland in China. *Soil Biology and Biochemistry*, 2003, vol. 35, no. 4, pp. 615–620.