ИЗВЕСТИЯ РАН. СЕРИЯ ГЕОГРАФИЧЕСКАЯ, 2018, № 2, с. 74–85

ПРИРОДОПОЛЬЗОВАНИЕ И ГЕОЭКОЛОГИЯ

УДК 004.942:550.47:631.417.1:631.417.4

ПРИЛОЖЕНИЕ МОДЕЛИ DNDC К ОЦЕНКЕ ПАРАМЕТРОВ УГЛЕРОДНОГО И АЗОТНОГО ОБМЕНА В ПАХОТНЫХ ПОЧВАХ НЕЧЕРНОЗЕМЬЯ

© 2018 г. Ольга Э. Суховеева

Институт географии РАН, Москва, Россия
E-mail: olgasukhoveeva@gmail.com

Поступила в редакцию 16.09.2016 г.

Аннотация. 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. Исследование логично разделяется на два блока: (1) оценка чувствительности модели и (2) ее верификация на основе данных полевых опытов и статистических расчетов. В данной статье представлены результаты анализа чувствительности модели к изменению входных параметров. Показано, что на региональные биогеохимические циклы азота, углерода и эмиссию парниковых газов в районе российского Нечерноземья ключевое влияние оказывает количество удобрений. Отмечено, что ежегодный прирост содержания органического углерода в почве зависит от складывающихся погодных условий и глинистости, или текстуры, почвы. Эмиссия диоксида углерода чувствительна к биологическим особенностям возделываемых культур и интенсивности почвообрабатывающих мероприятий. По данным моделирования, в агроценозах Нечерноземья метан, преимущественно, поглощается почвой. Концентрация закиси азота более чувствительна к почвообрабатывающим мероприятиям и внесению удобрений, чем к количеству осадков, а годовые ее величины колеблются в малом диапазоне.

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

DOI: 10.7868/S2587556618020073

APPLICATION OF THE DNDC MODEL FOR ESTIMATION OF CARBON AND NITROGEN EXCHANGE PARAMETERS IN ARABLE SOILS IN NON-CHERNOZEM ZONE

Olga E. Sukhoveeva

Institute of Geography, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia
E-mail: olgasukhoveeva@gmail.com

Received September 16, 2016

Abstract. The approbation of the DNDC (DeNitrification-DeComposition) model was done with the aim to estimate 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 of Russia. The research can be divided into two blocks: estimation of model sensitivity and its verification on the base of field experiments data and statistical calculations. This article presents the results of analysis of model sensitivity to input parameters change. It is shown that in the Russian Non-Chernozem Zone the amount of fertilizers is the most important factor influencing on regional carbon and nitrogen biogeochemical cycles and the greenhouse gases emission. Annual increase of soil organic carbon content depends on weather conditions and soil texture (clay fraction). Carbon dioxide emission isensitive to crops biological characteristics and tillage intensity. According to modeling data, in the Non-Chernozem Zone's agrocenoses methane is primarily absorbed by soil. The concentration of nitrous oxide is more sensitive to tillage and fertilizing than to amount of precipitation, and its annual values fluctuate in a small range.

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

Постановка проблемы. Повышение концентрации парниковых газов в атмосфере, включая диоксид углерода, или углекислый газ (CO_2), метан (CH_4) и закись азота (N_2O), вследствие антропогенной деятельности, считается одной из причин современного изменения климата. Значительная доля составляющих баланса парниковых газов в биогеохимических циклах связана с их депонированием и преобразованием в почвенном покрове. При этом одним из крупнейших источников антропогенной эмиссии парниковых газов в глобальном масштабе является сельское хозяйство.

Следует отметить, что с 2000 г. выбросы парниковых газов в секторе сельского хозяйства, лесного хозяйства и других видов землепользования в мире не возрастали в отличие от других секторов [6]. Среднегодовой общий их поток из сектора сельского хозяйства в среднем составил 5.0–5.8 млрд т CO_2-экв·год$^{-1}$, главным образом за счет выбросов N_2O от сельскохозяйственных почв и выбросов CH_4 от энтеральной ферментации скота, уборки, хранения и использования навоза, выбросов от рисовых полей [6]. По оценкам [12], в России прямой выброс N_2O от сельскохозяйственных почв составляет $0.5 \cdot 10^5$ тыс. т CO_2-экв., поток CH_4 при внутренней ферментации домашних животных равен $0.4 \cdot 10^5$ тыс. т CO_2-экв. В работе [9] также указано, что в биомах с преобладанием землепользования аграрного направления отмечаются наибольшие потери органического азота.

Важным источником парниковых газов в сельском хозяйстве являются пахотные почвы. Согласно Национальному кадастру антропогенных выбросов и абсорбции парниковых газов [10], показатели эмиссии на обрабатываемых почвах разнесены на два сектора: сектор землепользования, изменения землепользования и лесного хозяйства, куда включены эмиссии CO_2 в результате изменений запасов почвенного органического вещества, и сектор сельского хозяйства, в котором оцениваются потоки CH_4, N_2O и CO_2, связанные с возделыванием культур, известкованием и применением мочевины.

В силу многоплановости взаимосвязей между эмиссией парниковых газов в почвах и факторами окружающей среды для их интерпретации и прогноза на региональном уровне целесообразно использовать математические модели. Модель DNDC (DeNitrification-DeComposition) – процессно-ориентированная имитационная модель, созданная для оценки динамики основных парниковых газов в почвах сельскохозяйственного назначения [18]. Ее вычислительный аппарат строится на основе уравнений Нернста и Михаэлиса–Ментен, описывающих термодинамические и кинетические особенности окислительно-восстановительных реакций и представляющих функции от параметров окружающей среды – температуры, влажности, pH, испарения, которые регулируются несколькими группами экологических факторов – климатом, характеристиками почвы, растений и антропогенной деятельности [19].

Цель настоящего исследования – оценка возможности использования модели DNDC для анализа биогеохимических циклов азота (N) и углерода (C) и динамики парниковых газов в пахотных почвах Центрального района Нечерноземной зоны России, в том числе оценка чувствительности DNDC, т.е. нахождение наиболее значимых параметров модели, влияющих на эмиссию парниковых газов, прежде всего CO_2.

Методика исследований. Использована версия DNDC 9.5 [21]. Входными параметрами модели являются климатические данные, характеристики почвенного покрова, а также материалы по практике ведения аграрного производства, т.е. информация о возделываемых культурах, вносимых удобрениях и технологиях обработки почвы. Концептуальная схема модели представлена на рис. 1.

Для проверки *чувствительности модели к различным элементам сельскохозяйственной практики* был рассмотрен условный севооборот, состоящий из парового поля, озимой пшеницы (зерновая культура) и картофеля (пропашная культура), расположенный в Московской области, поскольку именно для нее было найдено наибольшее количество справочных данных, необходимых для инициации модели. Расчеты строились на основании средневзвешенных характеристик почвенного покрова, метеорологических данных, средних доз азотных минеральных и органических удобрений, рекомендуемых дат агротехнических мероприятий.

Основными характеристиками почвенного покрова, используемыми в модели, являются доля глинистой фракции, плотность, pH и содержание органического углерода в верхнем слое (0–10 см). Эти параметры рассчитывались на основе Единого государственного реестра почвенных ресурсов России [5]. Методика базировалась на нахождении средневзвешенных значений для каждого параметра в зависимости от доли территории региона, занимаемого данным типом почв. Рассматривались типы почв, доля площади которых составляла не менее 4.0% площади региона. Расчет входных параметров модели по характеристикам почв для Московской области представлен в табл. 1 и 2.

Климатические условия оценивались на основе информации ВНИИ ГМИ – МЦД [14] за период

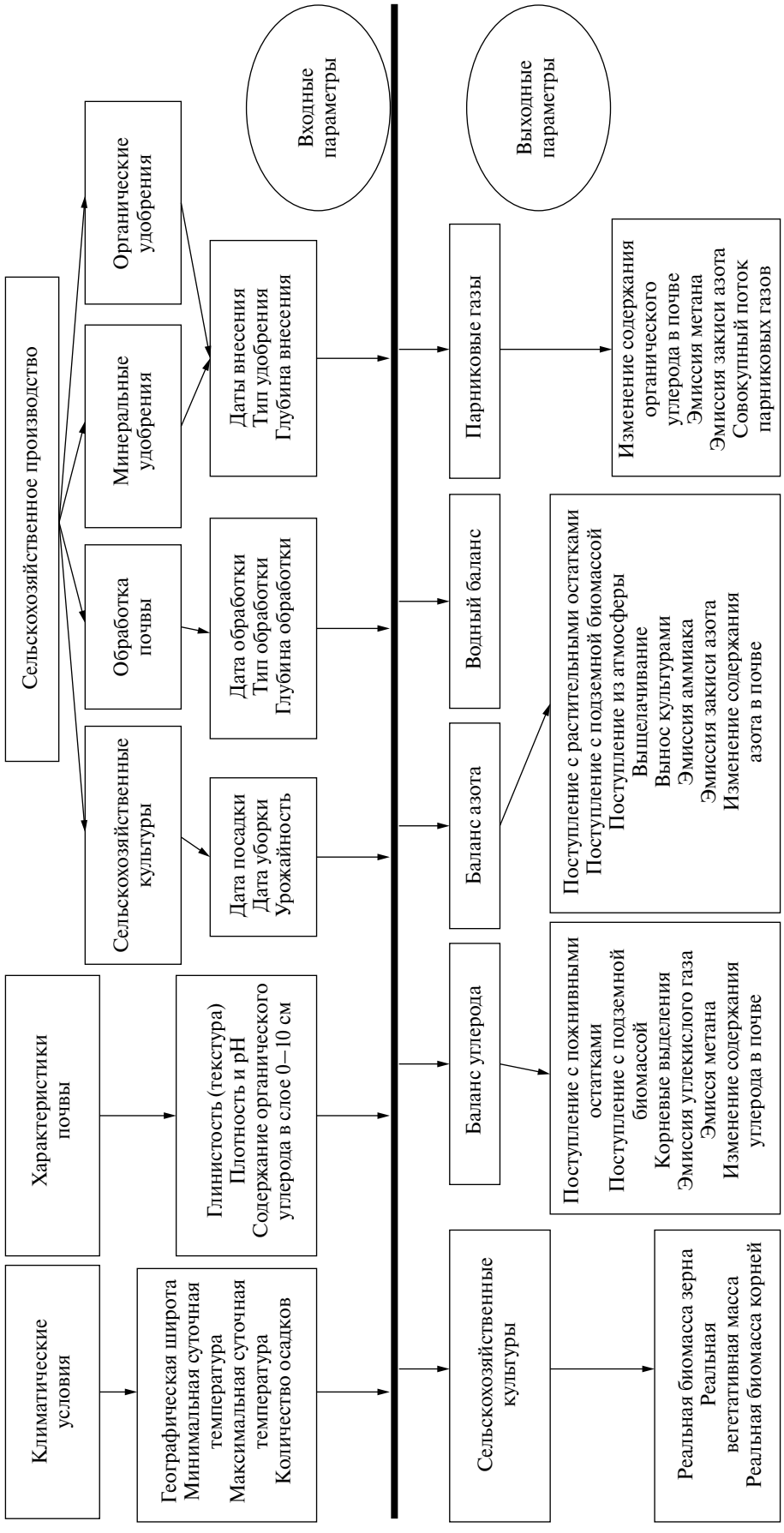

Рис. 1. Схема модели DNDC, актуальная для данного исследования. Представлены входные блоки, исходные данные для которых задавались, и выходные блоки, результаты которых анализировались.

Таблица 1. Характеристика почв Московской области

Тип почвы	Доля площади региона	Глинистость, %	Плотность, г/см^3	$pH_{сол}$
Дерново-подзолистые преимущественно мелко- и неглубокоподзолистые	43.4	13.0	–	5.8
Дерново-подзолистые преимущественно неглубокоподзолистые	15.4	29.0	–	4.0
Дерново-подзолистые глубокоглееватые и глееватые (в том числе поверхностно-глееватые) преимущественно глубокие	5.6	12.9	1.28	–
Подзолы глеевые торфянистые и торфяные, преимущественно иллювиально-гумусовые	8.6	–	–	3.2
Средневзвешенное	Всего 73.0%	16.82	1.28	5.06

Источник: составлено по [5].

Таблица 2. Содержание органического вещества ($C_{орг}$) в пахотных почвах по данным литературы

Почва	Значение $C_{орг}$	Единицы измерения	Перевод в кг С/кг почвы	Ссылка
Ротамстедская станция, Пропашной севооборот Пшеница	1.42–2.74 1.02–2.59	% к весу	0.0142–0.0274 0.0102–0.0259	[8]
Мещерское Полесье, Владимирская обл., Судогодский р-н, дерново-подзолистая супесчаная почва, стационарный опыт ВНИИОУ	0.62	% к весу	0.0062	
Длительный опыт ТСХА, дерново-подзолистая среднесуглинистая Пар	0.26	% к весу	0.0026	
Озимая рожь и Ячмень	0.29		0.0029	
Севооборот	0.28		0.0028	
Мещера, дерново-подзолистая супесчаная почва, микрополевой опыт Пашня при внесении удобрений	540.6–2586.0	мг С/кг почвы	0.000541–0.002586	
Огород	2600		0.0026	
Московская обл., г. Пущино, Опытная станция ИФХиБПП, серая лесная тяжелосуглинистая почва	1.1	% к весу	0.011	[13]
Московская обл., Домодедовский р-н, Опыт ВНИИА, дерново-подзолистая тяжелосуглинистая почва	8.87	г С/кг сухой массы	0.00887	[2]
Среднее расчетное по Нечерноземью Среднее расчетное по Московской области			0.004455 0.005634	–

Таблица 3. Среднее количество удобрений, вносимых в Московской области за 1990–2014 гг.

Культура	Озимая пшеница		Картофель	
Тип удобрений	Азотные минеральные, кг/га	Органические, т/га	Азотные минеральные, кг/га	Органические, т/га
Средняя	55.46±19.74	3.51±2.88	73.36±27.89	13.85±12.49

Источник: расчет по данным [3].

1990–2014 гг. по метеостанциям ВДНХ (Москва), г. Коломна и г. Можайск. При этом рассчитывались средние максимальные и минимальные значения температуры воздуха, среднее количество осадков.

Информация о вносимых под каждую культуру минеральных и органических удобрениях в Московской области была взята из Бюллетеней "Внесение удобрений под урожай и проведение работ по химической мелиорации земель" [3] за период 1990–2014 гг. Количество азотных удобрений (1) рассчитывалось через соотношение общего объема азотных удобрений, внесенных под конкретную культуру в области, и удобренной площади, или путем пропорционального нахождения доли азотных удобрений от минеральных:

$$n_N = \frac{V_N}{S_{\text{мин}}} \approx \frac{V_N \cdot n_{\text{мин}}}{V_{\text{мин}}}, \quad (1)$$

где n_N – доза азотных удобрений (кг/га), V_N – количество азотных удобрений (тыс. ц), $S_{\text{мин}}$ – площадь, удобренная минеральными удобрениями (тыс. га), $n_{\text{мин}}$ – доза минеральных удобрений (кг/га), $V_{\text{мин}}$ – общее количество минеральных удобрений (тыс. ц).

После расчета количества азотных удобрений (1) за каждый год находилась их средняя по области доза за 1990–2014 гг., вносимая под каждую культуру, которая и использовалась при моделировании (табл. 3).

Самым сложным этапом было определение точных календарных дат проведения посева, уборки, вспашки и внесения удобрений. Поэтому были использованы средние рекомендуемые даты проведения агротехнических мероприятий, указанные в типовых технологических картах [4].

Оценка чувствительности к различным сочетаниям внешних условий в агроэкосистемах проводилась по вариантам, которые были разработаны по мере усложнения воздействия внешних условий на почвенные процессы. В каждый следующий вариант включались все предыдущие параметры, и вводился один дополнительный элемент. Первый вариант представлял собой сочетание почвенных и климатических условий (фактически, парующая почва), во втором к ним добавлялась обработка почвы, в третьем – культивируемые растения (озимая пшеница и картофель), четвертый и пятый базировались на дополнительном внесении минеральных и органических удобрений соответственно, а в шестом варианте дозы вносимых удобрений увеличивались двукратно.

Результаты анализировались не только по абсолютным значениям, но и путем получения относительных характеристик k (2) на основе соотношения с аналогичным значением в первом варианте:

$$k = \frac{x_n}{x_1}, \quad (2)$$

где k – коэффициент, относительное значение параметра, x_n – численное значение параметра в n-ном варианте, x_1 – численное значение параметра в первом варианте.

Оценка *чувствительности модели к изменению характеристик почвенного покрова* (прежде всего, к текстуре почвы, или доле глинистой фракции) и *метеорологических условий* проводилась на примере картофеля, поскольку период его культивирования охватывает один год, а технология возделывания отличается наибольшим количеством почвообрабатывающих мероприятий. Доля глинистой фракции изменялась дискретно, основываясь на градации, используемой в модели. Для оценки влияния погодных условий были выбраны два смежных года: 2011 г., отличающийся высокими летними температурами и дефицитом осадков в вегетационный сезон, и 2012 г., характеризующийся избыточным увлажнением.

Чувствительность модели к изменению биотических факторов – биологических особенностей культур – оценивалась на основе объединения сельскохозяйственных растений в четыре группы с последующим нахождением среднего: зерновые (озимая и яровая пшеница, озимая рожь, яровые ячмень, овес, просо, т.е. культуры, продукция которых включает в себя зерно и солому), пропашные (картофель, кормовая свекла, овощи, т.е. культуры, в технологии возделывания которых присутствует одна или несколько междурядных обработок),

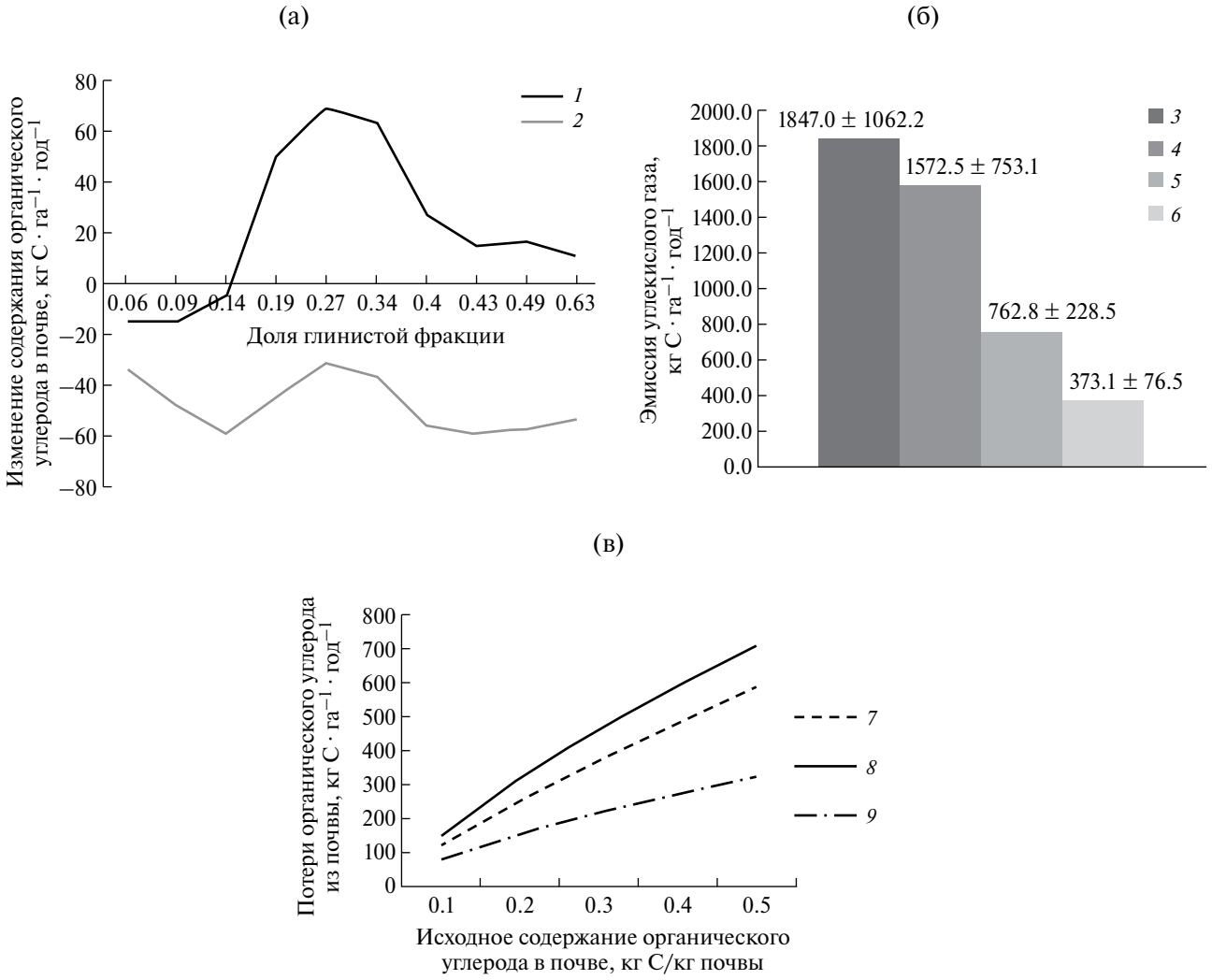

Рис. 2. Оценка чувствительности углеродного блока модели DNDC. а) к метеорологическим условиям и текстуре почвы (доле глинистой фракции); б) к биологическим особенностям возделываемых культур; в) к содержанию органического углерода в почве.
1 – метеорологические условия 2011 г., *2* – метеорологические условия 2012 г., *3* – пропашные культуры, *4* – зерновые культуры, *5* – технические культуры, *6* – бобовые культуры, *7* – глинистость почвы 0.03, *8* – глинистость почвы 0.27, *9* – глинистость почвы 0.63.

технические (лен, рапс, т.е. культуры, биомасса которых полностью убирается с поля), бобовые (горох, вика, т.е. азотфиксирующие культуры). Остальные параметры оставались неизменными в соответствии с описанием, приведенным выше.

Поскольку при проведении исследования было отмечено, что озимые культуры отличаются небольшими потерями углерода из почвы в процессе возделывания, озимая пшеница была выбрана для оценки *чувствительности модели к содержанию органического углерода* в почве. Моделирование проводилось для различных текстур почвы при отсутствии удобрений, при этом содержание $C_{орг}$ дискретно возрастало от 0 до максимально допустимого в модели (0.5 кг С/га).

Результаты исследований. Пробное моделирование динамики N и C в пахотных почвах для условий Центрального Нечерноземья показало, что DNDC чувствительна к изменению нескольких входных параметров, тогда как другие исходные компоненты оказывают малое воздействие на конечные показатели.

Итоговым результатом моделирования цикла углерода является изменение содержания $C_{орг}$, т.е. его накопление в почве или потеря за календарный год. Чаще всего этот параметр обратно пропорционален эмиссии CO_2. В результате анализа были отмечены высокая отзывчивость динамики $C_{орг}$ на изменение погодных условий (температуры Т и осадков Р, являющихся входными

параметрами модели) и существенные колебания его запаса в зависимости от глинистости почвы. График зависимости представлен на рис. 2а и имеет вид синусоиды с пиком (наибольшим накоплением/наименьшими потерями) при 19–40% глинистости. При этом, если в теплом засушливом 2011 г. ($T_{среднегодовая}$ = = 6.4 °C, $P_{годовая}$ = 570.1 мм) преимущественно шло накопление C, то в прохладном влажном 2012 г. ($T_{среднегодовая}$ = 5.6 °C, $P_{годовая}$ = 818.3 мм) этот элемент терялся из почвы.

Отмечены прямые корреляции между исходным содержанием $C_{орг}$, заданным при инициации модели, и уровнем ежегодных потерь углерода с эмиссией (рис. 2б). Как и в предыдущем примере, скорость потери органического углерода в почве обратно пропорциональна ее глинистости.

Наибольшую чувствительность к биотическим факторам модели – биологическим особенностям сельскохозяйственных культур – показала эмиссия углекислого газа. Как можно увидеть на рис. 2в, пропашные культуры способствуют выбросу в атмосферу максимального количества CO_2 до 2838 кг C · га$^{-1}$ · год$^{-1}$ (в среднем 1847.0 ± 1062.2 кг C · га$^{-1}$ · год$^{-1}$), тогда как его эмиссия с участков, занятых бобовыми, более чем в 7 раз ниже – 373.1 ± 76.5 кг C · га$^{-1}$ · год$^{-1}$. Немаловажную роль играет количество обработок почвы, наибольшее именно у пропашных культур.

В продолжение анализа условного севооборота было отмечено, что полученные расчетные значения элементов цикла азота: его выщелачивание в нижележащие слои почвы и вынос с продукцией культур, поступление от надземной биомассы и эмиссия аммиака – пропорциональны увеличению интенсивности ведения сельскохозяйственного производства. Но многие параметры биогеохимического цикла азота чувствительны лишь к малой доле внешних условий. Так, небиологическое связывание атмосферного N определяется только характеристиками почв и метеоусловиями, в среднем составляя 6.65 ± 1.64 кг N · га$^{-1}$ · год$^{-1}$. Азотфиксация среди рассматриваемых культур присутствует лишь у растений семейства бобовых. Численные значения потоков NO, NO_2 и N_2 незначительно отличаются от нуля. А такие параметры как поступление N от корневых остатков, поверхностного притока и оттока влаги в рассматриваемых примерах по результатам моделирования принимают нулевые значения.

Моделируемый диапазон суммарных годовых значений потока закиси азота в рассматриваемом регионе чрезвычайно мал. В среднем он равен 0.58 ± 0.79 кг $N–N_2O$ · га$^{-1}$ · год$^{-1}$, и лишь при обильном внесении удобрений может достигать 3.5 кг $N–N_2O$ · га$^{-1}$ · год$^{-1}$. Таким образом, на долю N_2O приходится лишь малая часть биогеохимического цикла N в почве.

В Нечерноземной зоне Европейской России эмиссия N_2O значительно сильнее откликается на проведение почвообрабатывающих мероприятий и внесение удобрений, чем на изменение погодных условий, в частности выпадение осадков. На рис. 3 представлены графики эмиссии N_2O и изменения содержания N в верхнем слое почвы за 2011 и 2012 гг. с суточным шагом. Наиболее высокие значения эмиссии соответствуют антропогенным воздействиям, тогда как отклик агроценоза на ливни значительно слабее.

Остановимся подробнее на *оценке чувствительности модели к особенностям сельскохозяйственного производства* с использованием последовательного введения переменных по вариантам, при котором оценивались изменения таких результирующих параметров как содержание азота в почве, содержание органического углерода в почве, эмиссия CO_2 и совокупный поток парниковых газов (рис. 4а). Наибольший отклик рассматриваемых потоков наблюдается при использовании удобрений, особенно органических. При этом содержание в почве азота и углерода меняется с их потери на накопление, а направление совокупного потока парниковых газов меняется с эмиссии в атмосферу на поглощение в почве.

Рассмотрим причины наблюдаемых изменений четырех результирующих параметров.

Содержание азота в пахотном слое уменьшается при обработке почвы и возделывании культур, а его накопление отмечается при внесении удобрений, особенно органических. В рассматриваемом севообороте увеличение содержания N при возделывании культур и внесении навоза идет со скоростью в 100 раз большей, чем на паровой неудобряемой почве.

В почве, лишенной растительности, содержание углерода будет постепенно убывать, прежде всего, за счет эмиссии CO_2 в результате минерализации почвенного органического вещества. При возделывании культур почвенная эмиссия увеличивается. Но часть C возвращается в почву в виде растительных остатков. При внесении минеральных и органических удобрений эмиссия CO_2 также увеличивается (в рассматриваемом примере при использовании навоза – в 17 раз), но одновременно возрастает годовой прирост запаса C по сравнению с необработанной почвой. Существенное увеличение эмиссии CO_2 при внесении органических удобрений можно объяснить как усилением дыхания корней растений, так и активизацией деятельности почвенной микрофлоры.

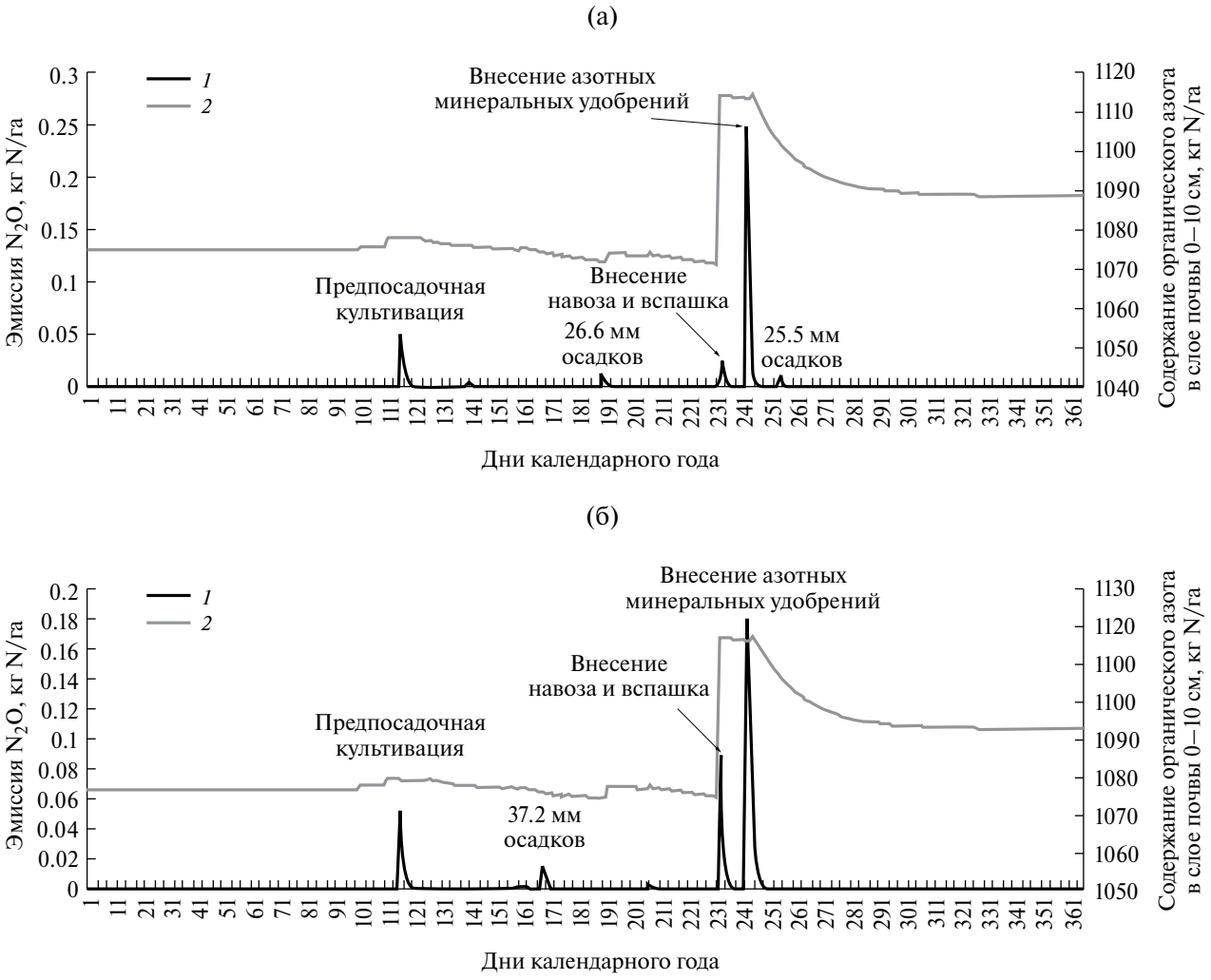

Рис. 3. Оценка чувствительности азотного блока модели DNDC к метеорологическим условиям и особенностям технологии возделывания сельскохозяйственных культур. а) метеорологические условия 2011 г., б) метеорологические условия 2012 г.
1 – эмиссия закиси азота, кг N/га, *2* – содержание органического азота в слое почвы 0–10 см, кг N/га

Значения совокупного потока парниковых газов в пересчете на CO_2-эквивалент в рассматриваемом условном севообороте положительны на парующей почве, т.е. происходит их эмиссия в атмосферу, и отрицательны при возделывании культур и внесении удобрений. В последнем случае поглощение проявляется в увеличении содержания $C_{орг}$ в почве пропорционально поступающим растительным остаткам и удобрениям.

Кроме CO_2, являющегося наиболее существенным компонентом цикла С, другие крупные потоки представлены его поступлением с надземной и подземной биомассой, корневыми выделениями, а также эмиссией метана. Согласно результатам моделирования, в агроэкосистемах Нечерноземья CH_4 в основном поглощается почвой в малых количествах, а эмиссия наблюдается только при возделывании пропашных культур и обильном использовании удобрений. В рассматриваемом условном севообороте поглощение CH_4 идет со скоростью 0.1 ± 0.0 кг $C \cdot га^{-1} \cdot год^{-1}$ и не меняется по вариантам моделирования (рис. 4б).

Обсуждение результатов. По результатам анализа чувствительности DNDC, проведенного в рамках настоящего исследования, было отмечено, что наиболее существенными факторами, определяющими особенности биогеохимических циклов N и C в пахотных почвах Нечерноземья, являются вносимые удобрения (для всех выходных параметров), глинистость почвы и погодные условия (для определения ежегодного прироста / убыли содержания $C_{орг}$ в почве), а также биологические особенности культур (для эмиссии CO_2) и технологии обработки почвы (для эмиссии N_2O).

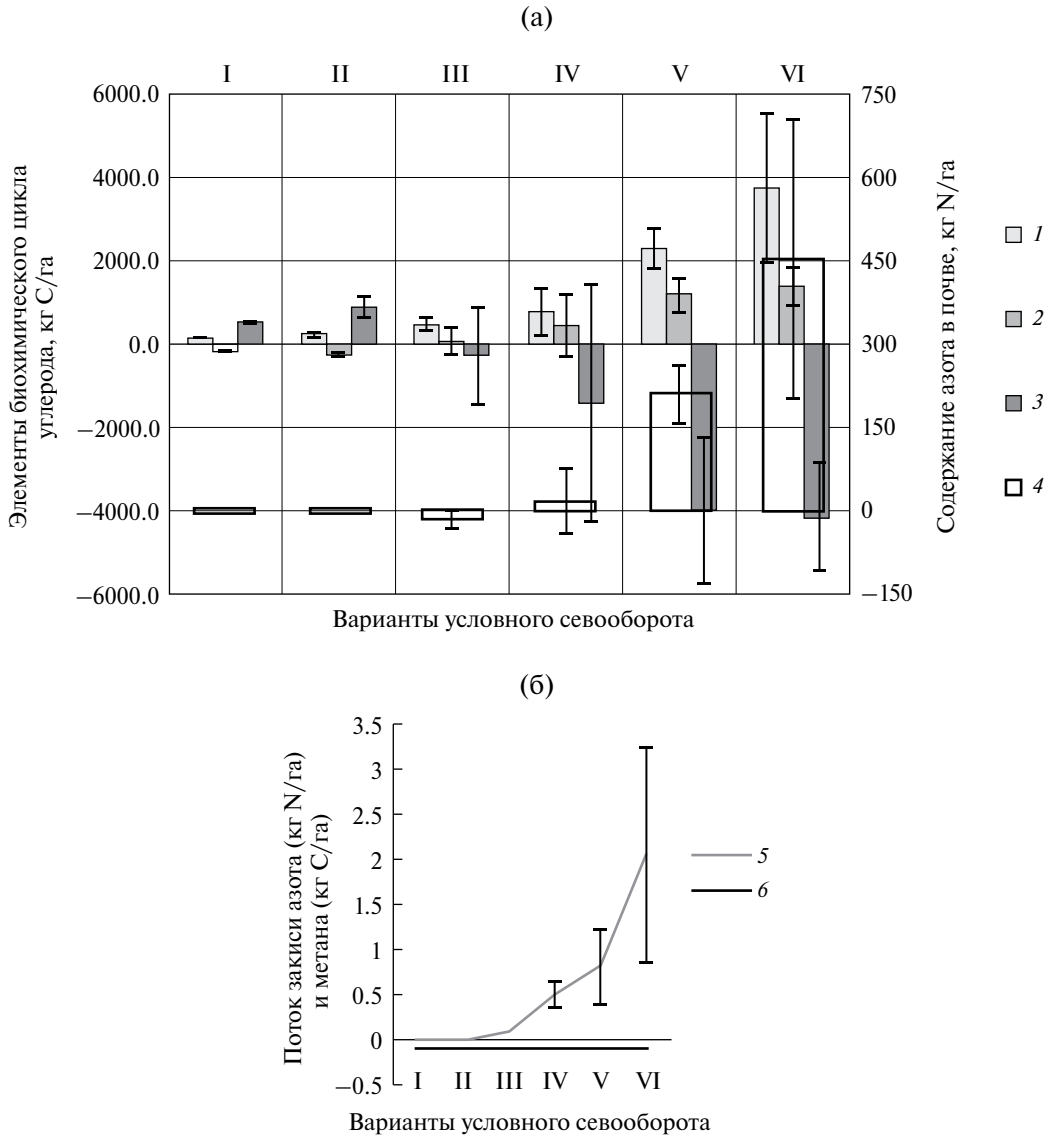

Рис. 4. Оценка чувствительности модели к различным сочетаниям внешних условий (соотношение и пропорциональность потоков азота и углерода в агроэкосистемах): а) крупные потоки, б) малые потоки.
1 – поток углекислого газа, *2* – содержание углерода в почве, *3* – совокупный потенциал парниковых газов в пересчете на CO_2-эквивалент, *4* – содержание азота в почве, *5* – поток закиси азота, *6* – поток метана. Варианты: I – климат и почва; II – климат, почва и обработка почвы; III – климат, почва, обработка почвы и растения; IV – климат, почва, обработка почвы, растения и минеральные удобрения; V – климат, почва, обработка почвы, растения, минеральные и органические удобрения; VI – климат, почва, обработка почвы, растения, двойные дозы минеральных и органических удобрений.

Эти факторы были также отмечены и в работах других исследователей поведения модели. Так, первоначальная проверка чувствительности DNDC проводились ее автором на посевах кукурузы в США [20]. Было отмечено, что на содержание $C_{орг}$ в почве влияют органические удобрения, снижение интенсивности обработки почвы, увеличение содержания азота в минеральных удобрениях, результаты моделирования чувствительны к текстуре почвы, начальному содержанию углерода и годовому количеству осадков. При оценке урожайности, динамики почвенного углерода и потоков газов на посевах риса и озимой пшеницы в Китае и кукурузы в Айове, США, результаты разновидности модели Crop-DNDC были чувствительны к климатическим условиям, концентрации CO_2 и различным агротехническим приемам [22]. При прогнозе эмиссии N_2O на делянках ярового ячменя, картофеля и белокочанной капусты на супесчаных подзолистых почвах северо-запада

Европейской России DNDC была чувствительна к сумме осадков, доле пор, заполненных водой и количеству азотных удобрений [17].

Наблюдаемую зависимость динамики накопления углерода от метеоусловий можно объяснить изменением активности почвенной микробиоты и скорости протекания химических реакций в зависимости от температуры и влажности во внешней среде. Другая характеристика почвы – глинистость – характеризует не только ее агрегатное состояние, но и условия протекания химических реакций, в том числе – количество активных каталитических центров на единицу объема, отвечающих за образование того или иного продукта реакции. По данным [1], трансформация органических и неорганических веществ в почве носит ферментативный характер и изменяется под влиянием влажностного и аэрационного режима.

По результатам моделирования было показано, что элементы баланса N, в основном, зависят от погодно-климатических условий и особенностей почвенного покрова, тогда как на составляющие баланса C, в частности на эмиссию CO_2, в большей степени влияют биологические особенности возделываемых культур. Слабое влияние погодных условий на эмиссию углекислого газа также отмечено в [7], по данным которой ключевое значение для суммарной годовой эмиссии CO_2 из почв имеет тип экосистемы.

Отмечено, что большинство параметров моделируемого цикла азота и особенно углерода изменяются пропорционально интенсивности ведения аграрного производства. Аналогичные выводы есть в [11], где анализируется зависимость состояния фракций углерода от хозяйственной деятельности. Согласно выводам автора, система удобрений и севооборот являются ключевыми факторами, определяющими особенности накопления углерода в почве, в частности его активной фракции, а уровень продукции определяет накопление запасов C в форме легкотрансформируемой фракции.

Модельные данные об относительно низких значениях эмиссии CO_2 из агроценозов озимых и бобовых растений косвенно согласуются с результатами [15], согласно которым культуры, оставляющие большое количество корневых и пожнивных остатков, – зерновые, многолетние и однолетние травы – стабилизируют баланс углерода.

Интересны модельные данные о поглощении CH_4 почвами Нечерноземья. В [16] приведены результаты полевых наблюдений поглощения этого газа парующей легкосуглинистой дерново-подзолистой почвой, численные значения которого увеличивались пропорционально росту плодородия почвы и параллельно увеличению эмиссии CO_2.

Следует отметить, что изначально DNDC создавалась, как модель эмиссии N_2O, связанной с дождевыми явлениями [18]. В Нечерноземье осадки также влияют на этот параметр, но гораздо сильнее ощущается воздействие антропогенного фактора в форме обработки почвы и внесения удобрений. Вероятно, это связано с тем, что Нечерноземье относится к зоне достаточного увлажнения, поэтому выделение закиси азота в результате денитрификации на территориях без сельскохозяйственной практики носит относительно монотонный характер.

Заключение. Оценка чувствительности DNDC показала, что для всех моделируемых параметров биогеохимических циклов азота и углерода в пахотных почвах Нечерноземья наиболее значимыми факторами являются вносимые удобрения особенно органические. Их использование позволяет покрыть потери N и C, связанные с отчуждением растительной биомассы при уборке сельскохозяйственных культур, но одновременно повышает эмиссию парниковых газов.

Компоненты моделируемого цикла углерода и, прежде всего, динамика накопления $C_{орг}$ в почве чувствительны к изменениям глинистости (текстуры) почвы и погодно-климатических условий. Эмиссия CO_2 чувствительна к биологическим особенностям сельскохозяйственных культур, особенностям технологии их возделывания и проведения почвообрабатывающих мероприятий. При этом наибольшие ее значения отмечаются у пропашных культур, а наименьшие – у бобовых. Моделируемые потоки CH_4 практически не зависят от особенностей сельскохозяйственного производства, составляют малую часть биогеохимического цикла C и чаще направлены на сток этого газа в почву.

Численные оценки потока закиси азота колеблются в малом диапазоне значений и увеличиваются пропорционально выпадающим осадкам, но значительно большее влияние на их динамику в Нечерноземье имеют почвообрабатывающие мероприятия и внесение удобрений. Другие составляющие баланса N малочувствительны к условиям моделирования в части особенностей технологии возделывания и в основном зависят от характеристик почвенного покрова и погодных условий отдельных лет.

Моделируемый совокупный поток парниковых газов направлен на выброс их в атмосферу из песчаных почв и участков, оставленных под паром. Отмечена возможность поглощения парниковых газов глинистыми почвами или участками, занятыми зерновыми, покровными и бобовыми культурами, с одновременным накоплением в них $C_{орг}$.

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 директору Института глобального климата и экологии Росгидромета и РАН, члену-корреспонденту РАН, д.б.н. Романовской Анне Анатольевне за научное консультирование при выполнении исследования.

Acknowledgments. This study was done within framework of basic scientific research no. 0148-2014-0005 “Solution of fundamental problems of analysis and forecast of Earth climatic system condition” (no. 01201352499). Author is grateful to Director of Institute of Global Climate and Ecology of Roshydromet and RAS, corresponding member of the RAS A.A. Romanovskaya for scientific consultations.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Алексеева А.А., Фомина Н.В.* Анализ активности редуцирующих ферментов агрогенно измененных почв лесных питомников лесостепной зоны Красноярского края // Вестн. Красноярского гос. аграрного ун-та. 2015. № 1. С. 32–35.
2. *Алиев А.М., Варламов В.А., Державин Л.М., Самойлов Л.Н., Переведенцева С.В., Яковлева Т.А.* Эффективность удобрений при их комплексном применении со средствами защиты растений в полевом севообороте (опыт СШ-2/60) // Результаты длительных исследований в системе географической сети опытов с удобрениями Российской Федерации. К 70-летию Геосети. М.: ВНИИ агрохимии им. Д.Н. Прянишникова РАСХН, 2011. С. 17–33.
3. Внесение удобрений под урожай 1990–2014 гг. и проведение работ по химической мелиорации земель. М.: Росстат, ГМЦ, 1991–2015. 64 с.
4. *Грачев В.А.* Типовые технологические карты для планирования и организации производства зерна, кормов, картофеля и льна-долгунца в хозяйствах Центрального района Нечерноземной зоны РСФСР. М.: Мин-во сел. хоз-ва РСФСР, ВНИИ экономики, труда и упр. в сел. хоз-ве, 1980. 145 с.
5. Единый государственный реестр почвенных ресурсов России. Версия 1.0. Коллективная монография. М.: Почвенный ин-т им. В.В. Докучаева Россельхозакадемии, 2014. 768 с.
6. Изменение климата, 2014 г.: Смягчение воздействий на изменение климата. Вклад Рабочей группы III в Пятый оценочный доклад Межправительственной группы экспертов по изменению климата. Кембридж: Юниверсити Пресс, 2014. 1435 с.
7. *Курганова И.Н., Лопес де Гереню В.О., Мякшина Т.Н., Сапронов Д.В., Кудеяров В.Н.* Эмиссия CO_2 из почв различных экосистем южно-таежной зоны: анализ данных непрерывных 12-летних круглогодичных наблюдений // Докл. Академии наук. 2011. Т. 436. № 6. С. 843–846.
8. *Лыков А.М., Еськов А.И., Новиков М.Н.* Органическое вещество пахотных почв Нечерноземья (актуальность и состояние проблемы, рабочие гипотезы исследования, сопряженность агрономических и экологических функций, динамика в агроценозах, принципы моделирования и технология воспроизводства). М.: Россельхозакадемия, ГНУ ВНИПТИОУ, 2004. 630 с.
9. *Моисеев Б.Н., Алябина И.О.* Оценка и картографирование составляющих углеродного и азотного балансов в основных биомах России // Изв. РАН. Сер. геогр. 2007. № 5. С. 116–127.
10. 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.
11. *Романенков В.А.* Динамика запасов почвенного углерода в агроценозах Европейской территории России (по данным длительных агрохимических опытов). Автореф. дисс. ... д-ра биол. наук. М.: ВНИИ агрохимии им. Д.Н. Прянишникова, 2010. 46 с.
12. *Романовская А.А.* Выбросы метана и закиси азота в аграрном секторе России // Метеорология и гидрология. 2008. № 2. С. 87–97.
13. *Сапронов Д.В.* Многолетняя динамика эмиссии CO_2 из серых лесных и дерново-подзолистых почв. Автореф. дисс. ... канд. биол. наук. Пущино: ИФХиБПП РАН, 2008. 20 с.
14. Специализированные массивы для климатических исследований: Информация ВНИИГМИ-МЦД [Электронный ресурс] http://aisori.meteo.ru/ClimateR (Дата обращения 06.06.2017 г.).
15. *Хохлов В.Г.* Органическое вещество дерново-подзолистых почв Смоленской области. Автореф. дисс. ... канд. с.-х. наук. М.: ТСХА, 1980. 16 с.
16. *Чистотин М.В., Хайдуков К.П., Сафонов А.Ф.* Связь между пространственной вариацией поток С-содержащих газов и свойствами почвы Длительного опыта ТСХА // Известия ТСХА. 2012. № 3. С. 27–35.
17. *Balashov E., Horak J., Siska B., Buchkina N., Rizhiya E., and Pavlik S.* N_2O fluxes from agricultural soils in Slovakia and Russia – direct measurements and prediction using the DNDC model // Folia Oecologica. 2010. Vol. 37. No. 1. P. 8–15.
18. *Li C., Frolking S., and Frolking T.A.* A model of nitrous oxide evolution from soil driven by rainfall events: 1. Model structure and sensitivity // J. of geophysical research. 1992. Vol. 97. No. D9. P. 9759–9776.
19. *Li C.* Quantifying greenhouse gas emissions from soils: Scientific basis and modeling approach // Soil Science and Plant Nutrition. 2007. Vol. 53. № 4. P. 344–352.

20. *Li C., Frolking S., and Harriss R.* Modelling carbon biogeochemistry in agricultural soils // Global Biogeochemistry Cycles. 1994. No. 8. P. 237–254.
21. User's guide for the DNDC model. Version 9.5. Institute for the study of Earth, Oceans, and Space. USA: Univ. of New Hampshire, 2012. 104 p.
22. *Zhang Y., Li C., Zhou X., and Moore B.* A simulation model linking crop grows and soil biogeochemistry for sustainable agriculture // Ecological modelling. 2002. No. 151. P. 75–108.

REFERENCES

1. Alekseeva A.A., Fomina N.V. The analysis of the reducingenzyme activity of the agrogenic changed soils in the forest nurseries of the Krasnoyarsk krai forest-steppe zone. *Vestn. Krasnoyarsk. Gos. Agr. Univ.,* 2015, no. 1, pp. 32–35. (In Russ.).
2. Aliev A.M., Varlamov V.A., Derzhavin L.M., Samoilov L.N., Perevedentseva S.V., Yakovleva T.A. Efficiency of fertilizers and pesticides complex using in crop rotation (field experiment CSh-2/60). In *Rezul'taty dlitel'nykh issledovanii v sisteme geograficheskoi seti opytov s udobreniyami Rossiiskoi Federatsii* [Results of Long-term Research in System of Geographical Web of Experiments on Fertilizers in Russian Federation]. Moscow: ARRIA Publ., 2011, pp. 17–33. (In Russ.).
3. *Vnesenie udobrenii pod urozhai 1990–2014 gg. i provedenie rabot po himicheskoi melioratsii zemel'* [Fertilizers Input for Yields 1990–2014 and Implementation of Chemical Melioration]. Moscow: Rosstat Publ., 1991–2015. 64 p.
4. Grachev V.A. *Tipovye tekhnologicheskie karty dlya planirovaniya i organizatsii proizvodstva zerna, kormov, kartofelya i l'na-dolguntsa v hozyaistvakh Central'nogo raiona Nechernozemnoi zony RSFSR* [Typical Technological Cards for Planning and Organization of Grain, Feed, Potato, and Flax Production in Farms of Central Non-Chernozem Zone of Russia]. Moscow: Ministry of Agriculture, 1980. 145 p.
5. *Edinyi gosudarstvennyi reestr pochvennykh resursov Rossii*. Versia 1.0. [Unified State Register of Soil Recourses of Russia]. Moscow: Soils Institute, 2014. 768 p.
6. *Climate Change 2014*: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: University Press, 2014. 1435 p.
7. Kurganova I.N., Lopes de Gerenyu V.O., Myakshina T.N., Sapronov D.V., Kudeyarov V.N. CO_2 emission from soils of various ecosystems of the southern taiga zone: data analysis of continuous 12-year monitoring. *Dokl. Biol. Sci.*, 2011, vol. 436, no. 6, pp. 843–846. (In Russ.).
8. Likov A.M., Es'kov A.I., Novikov M.N. *Organicheskoe veshchestvo pakhotnykh pochv Nechernozem'ya* [Organic matter of arable soils of Non-Chernozem Zone]. Moscow: Rosselchozakademia, 2004. 630 p.
9. Moiseev B.N., Alyabina I.O. Evaluation and mapping of components of carbon and nitrogen balance in the Main Bioms of Russia. *Izv. Ross. Akad. Nauk. Ser. Geogr.*, 2007, no. 5, pp. 116–127. (In Russ.).
10. 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, 2015. 476 p.
11. Romanenkov V.A. Dynamics of soil carbon storage in agrocenoses of European part of Russia (on the base of long-term agrochemical field experiments). *Extended Abstract of Doctoral (Biol.) Dissertation*. Moscow, ARRIA, 2010. 46 p.
12. Romanovskaya A.A. Methane and nitrous oxide emission in the agricultural sector of Russia. *Russ. Meteor. Hydrol.*, 2008, no. 2, pp. 87–97. (In Russ.).
13. Sapronov D.V. Long-term dynamics of CO_2 emission from grey forest and sod-podzol soils. *Extended Abstract of Cand. Sci. (Biol.) Dissertation*. Pushchino, IFCBPS RAS, 2008. 20 p.
14. *Spetsializirovannye massivy dlya klimaticheskikh issledovanii: Informacia VNIIGMI-MCD* [Special massifs for climatic research: Information of RIHMI-WDC]. http://aisori.meteo.ru/ClimateR.
15. Khokhlov V.G. Organic matter of sod-podzolic soils in Smolensk region. *Extended Abstract of Cand. Sci. (Agricult.) Dissertation*. Moscow: MTAA Publ., 1980. 16 p. (In Russ.).
16. Chistotin M.V., Haidukov K.R., Safonov A.F. Connection between spatial variation of C-containing gases flows and soil properties in the long-term experiment of RTSAU. *Izv. Timiryazev Agricult. Acad.,* 2012, no. 3, pp. 27–35. (In Russ.).
17. Balashov E., Horak J., Siska B., Buchkina N., Rizhiya E., and Pavlik S. N_2O 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.
18. Li C., Frolking S., and Frolking T.A. A model of nitrous oxide evolution from soil driven by rainfall events: 1. Model structure and sensitivity. *J. Geophys. Res.*, 1992, vol. 97, no. D9, pp. 9759–9776.
19. Li C. Quantifying greenhouse gas emissions from soils: Scientific basis and modeling approach. *Soil Sci. Plant Nutrition*, 2007, vol. 53, no. 4, pp. 344–352.
20. Li C., Frolking S., and Harriss R. Modelling carbon biogeochemistry in agricultural soils. *Global Biogeochem. Cycles*, 1994, no. 8, pp. 237–254.
21. *User's guide for the DNDC model*. Version 9.5. Institute for the Study of Earth, Oceans, and Space. USA, University of New Hampshire, 2012. 104 p.
22. Zhang Y., Li C., Zhou X., and Moore B. A simulation model linking crop grows and soil biogeochemistry for sustainable agriculture. *Ecolog. Mmodel.*, 2002, no. 151, pp. 75–108.