УДК 633/635:551.58

ОЦЕНКА ДИНАМИКИ ОРГАНИЧЕСКОГО УГЛЕРОДА ЧЕРНОЗЕМА ОПОДЗОЛЕННОГО В ПОЛЕВОМ СЕВООБОРОТЕ ПРИ ИЗМЕНЕНИИ КЛИМАТА

А. Н. ПОЛЕВОЙ [1)], ***Л. Е. БОЖКО*** [1)]

[1)]*Одесский государственный экологический университет,*
ул. Львовская, 15, 65016, г. Одесса, Украина

Представлена оценка возможного баланса органического углерода в почве и выделений CO_2-C в полевом десятипольном севообороте в условиях изменения климата. Ожидаемые в 2021–2050 гг. показатели метеорологических условий определялись с помощью климатических сценариев RCP4.5 и RCP8.5. В исследовании использовалась усовершенствованная авторами модель кругооборота углерода в почве RothC-26.3, которая описывает динамику четырех активных и одного инертного компартментов органического вещества почвы. В численных экспериментах с моделью рассмотрен полевой десятипольный севооборот в трех вариантах: 1) выращивание культур без внесения удобрений; 2) внесение минеральных удобрений в дозах $N_{45}P_{45}K_{45}$ и $N_{90}P_{90}K_{90}$; 3) внесение органических удобрений порядка 9 и 18 т/га. Изучен возможный баланс органического углерода в почве и выделения CO_2-C на всех полях севооборота и на одном конкретном поле при изменении климата.

Ключевые слова: баланс; углерод; севооборот; осадки; температура воздуха; минеральные удобрения; органические удобрения; коэффициент увлажнения.

ASSESSMENT OF ORGANIC CARBON DYNAMICS IN PODZOLIZED CHERNOZEM SOIL IN FIELD CROP ROTATION UNDER THE CLIMATE CHANGE

A. N. POLEVOY [a], ***L. E. BOZKO*** [a]

[a]*Odessa State Environmental University, 15 Lvivska Street, Odessa 65016, Ukraine*
Corresponding author: A. N. Polevoy (apolevoy@te.net.ua)

The work presents assessment of organic carbon in the soil and CO_2-C emissions for the ten-field crop rotation in a changing climate conditions. The expected weather conditions for the 2021–2050 are estimated with RCP4.5 and RCP8.5 models. The research uses the updated model for the soil carbon cycle RothC-26.3, which describes the dynamics of four active and one inert compartments of the soil organic matter. The numerical studies consider three variants of the

Образец цитирования:
Полевой АН, Божко ЛЕ. Оценка динамики органического углерода чернозема оподзоленного в полевом севообороте при изменении климата. *Журнал Белорусского государственного университета. География. Геология.* 2019;2:65–78.
https://doi.org/10.33581/2521-6740-2019-2-65-78

For citation:
Polevoy AN, Bozko LE. Assessment of organic carbon dynamics in podzolized chernozem soil in field crop rotation under the climate change. *Journal of the Belarusian State University. Geography and Geology.* 2019;2:65–78. Russian.
https://doi.org/10.33581/2521-6740-2019-2-65-78

Авторы:
Анатолий Николаевич Полевой – академик Академии наук высшей школы Украины, доктор географических наук, профессор; заведующий кафедрой агрометеорологии и агроэкологии Гидрометеорологического института.
Людмила Ефимовна Божко – кандидат географических наук, доцент; доцент кафедры агрометеорологии и агроэкологии Гидрометеорологического института.

Authors:
Anatoliy N. Polevoy, academician of the Higher School Academy of Sciences of Ukraine, doctor of science (geography), full professor; head of the department of agrometeorology and agroecology, Hydrometeorological Institute.
apolevoy@te.net.ua
Ludmila E. Bozko, PhD (geography), docent; associate professor at the department of agrometeorology and agroecology, Hydrometeorological Institute.
bozko@i.ua

CC BY NC

ten-fields crops rotation: 1) growing crops without fertilizing; 2) fertilization with mineral fertilizers in $N_{45}P_{45}K_{45}$ and $N_{90}P_{90}K_{90}$ doses; 3) fertilization with organic fertilizers in the amounts of 9 and 18 t/ha. The research object is the balance of organic carbon in the soil and CO_2–C emissions from all crop rotation fields and the singular crop rotation field in the climate change conditions.

Keywords: balance; carbon; crop rotation; precipitation; air temperature; mineral fertilizers; organic fertilizers; moisture coefficient.

Введение

Под плодородием почвы понимается ее способность снабжать растения питательными веществами, водой и воздухом, необходимыми для их качественного развития и размножения. Плодородие – это основной и самый важный признак, отличающий почву от горной породы и любых других природных образований земной суши. Почва обеспечивает растения всем необходимым благодаря бесчисленным химическим, физическим и биологическим процессам, которые в ней протекают. Именно в результате этих процессов почва создает, накапливает, распределяет и в нужный момент отдает вещества, требующиеся растениям.

Одним из главных показателей почвенного плодородия является содержание гумуса и его качество. Изменение количества гумуса в почве обусловливается процессами гумификации и минерализации органических веществ. Динамика его вариации в почве наиболее достоверно определяется в ходе продолжительных стационарных опытов, которые позволяют судить о влиянии разнообразных агротехнических мероприятий на содержание гумуса и состояние почвы [1, с. 73].

Оценка уровня плодородия почвы может производиться по отдельным свойствам, однако это затруднено тем, что различные показатели имеют разные значения. Поэтому наиболее объективным критерием выступает комплексный показатель – индекс окультуренности почв, где каждое свойство выражается в относительных величинах и отражает степень соответствия почвы требованиям культурных растений. Актуальной при этом также является оценка динамики гумуса и выделения CO_2 из сельскохозяйственных полей в условиях изменения климата.

Существуют различные подходы к определению баланса гумуса в почве [2, p. 4–5]. Условно по специфическим целям и методическим приемам их можно разделить на две группы: 1) экологические, основанные на моделировании динамики органического углерода в почве; 2) агрономические, главная цель которых – сохранение оптимальных почвенных функций и определение требуемого для этого количества органических удобрений. В работе [2, p. 6] приводится характеристика семи наиболее применяемых в Европе исследовательских подходов, отличающихся целями, концепциями моделирования, охватом учитываемых влияющих факторов и процедурами валидации.

Будущая динамика органического углерода в почве оценивается с помощью биогеохимических моделей различной сложности, а также сценариев изменения климата.

Потенциальное влияние климатических изменений на свойства почв детально рассмотрено в обзоре [3, p. 54–59]. В работе [4, p. 17–20] приводятся результаты моделирования воздействия изменения климата и увеличения атмосферного CO_2 на продуктивность травянистой растительности и содержание углерода в почве на 31 участке умеренной и тропической зон с помощью модели CENTURY, которые показали существенное повышение продуктивности трав и потери углерода почвы через 50 лет. Аналогичные результаты получены в исследовании с помощью модели SOCRATES продуктивности растений и динамики органического углерода в почве в условиях Австралии на ближайшие 100 лет [5, p. 3]. С использованием моделей CENTURY33 и RothC-34 в работе [6, p. 170] рассмотрено влияние температуры на углерод почвы при изменении климата: отмечается уменьшение количества углерода в различных типах почвы через 100 лет.

В пределах Европы содержание углерода в почве при климатических изменениях в 1990–2080 гг. исследовалось с помощью модели Lund-Potsdam-Jena [7, p. 2145], в 1990–2100 гг. – модели LPJ-DGVM [8, p. 391–393]. С использованием модели CarboSOIL для Андалузии (Испания) [9, p. 8253] проведена оценка динамики почвенного углерода до 2040, 2070, 2100 гг. В странах Балтии выполнены разноплановые фундаментальные исследования изменения климата, включая анализ его влияния на баланс углерода почвы [10, p. 281]. В Дании в течение 20 лет (1991–2010) с помощью CROP-SOIL models изучалась вариация углерода в почве при возделывании озимой пшеницы [11, p. 146]. Сверхдолгосрочные оценки динамики органического углерода в почве для Дании и Китая получены с использованием Bern Carbon Cycle Model в работе [12, p. 218]: отмечается уменьшение содержания углерода через 20, 100 и 200 лет.

В условиях Канады с помощью Long-Term Organic Carbon Model [13, p. 198] оценивалось количество углерода почвы на пастбище при различной степени покрытости растительным покровом на периоды 100, 200, 300 и 400 лет.

В работе [14, p. 802] с использованием статистического анализа BMDP Statistical Software рассматривалась изменчивость содержания углерода в почве на примере 500 пастбищных и 300 культивированных почв Центральных равнин США.

В Бразилии с помощью модели CQESTR исследовалась динамика углерода в тропической почве как без обработки, так и при пахоте с 1927 до 2033 г. и с 1986 до 2036 г. [15, p. 123]. Для обоих вариантов опыта отмечается устойчивое снижение содержания углерода.

Для Африки и Юго-Восточной Азии обобщающие оценки относительно влияния климатических изменений на продуктивность почв и содержание в них углерода получены с помощью модели ForNBM [16, p. 10–12]. В материалах ФАО [17, p. 7–8] с использованием комплекса моделей (CENTURY, DNDC, RothC-34, LPJ-DGVM, CESAR) всесторонне анализируется влияние изменений климата на углерод почвы.

Материалы и методы исследования

В основу исследования был положен набор климатических сценариев, а именно репрезентативные траектории концентраций (*representative concentration pathways*, RCP) углекислого газа. Наиболее изученными сценариями изменения климата считаются два из них – RCP4.5 и RCP8.5. Самым пессимистическим является сценарий RCP8.5, предусматривающий экспоненциальное увеличение содержания углекислого газа в атмосфере до конца XXI в. примерно в 2,5 раза по сравнению с современным [18, с. 18]. Помимо этого, в исследовании использовалась усовершенствованная авторами модель кругооборота углерода в почве RothC-26.3, которая описывает динамику четырех активных и одного инертного компартментов органического вещества почвы [19, p. 239]. В алгоритм модели RothC-26.3 нами введена полученная на основе работы [20, с. 128] система уравнений, позволяющая разделить растительные остатки по месяцам вегетации, и предложенные в [21, с. 107] уравнения, которые дают возможность вычислить их суммарную величину. Также добавлен расчет температуры почвы на глубине 20 см и изменено определение водного режима почв.

Моделирование динамики органического вещества в минеральных почвах и выбросов углерода из них базируется на обосновании концепции разделения органического вещества растительных остатков и почв на активные и пассивные компартменты и дальнейшем количественном описании их динамики.

В модель включены все главные процессы кругооборота углерода, интенсивность которых описывается уравнением первого порядка. Во время процесса разложения происходит обмен органическим веществом между пулами. При аэробных условиях это приводит к потерям углерода в виде CO_2.

Идентификация параметров модели выполнялась на основе опубликованных в литературных источниках материалов наблюдений, которые были получены в ходе продолжительных стационарных опытов при исследовании динамики гумуса в Правобережной лесостепи Украины [1, с. 82].

Рассматривался полевой десятипольный севооборот со следующим чередованием сельскохозяйственных культур: клевер (сено) – озимая пшеница – сахарная свекла – кукуруза – горох – озимая пшеница – кукуруза – озимая пшеница – сахарная свекла – яровой ячмень. Основной тип почвы – чернозем оподзоленный. Перед началом стационарных опытов запасы гумуса в слое 0–20 см составляли 82,1 т/га [1, с. 82]. При проведении численных экспериментов с моделью эта величина принималась в качестве начальной. Анализировались три варианта: 1) выращивание культур без внесения удобрений; 2) с внесением минеральных удобрений в дозах $N_{45}P_{45}K_{45}$ и $N_{90}P_{90}K_{90}$; 3) с внесением навоза порядка 9 и 18 т/га.

С помощью модели была выполнена оценка возможного баланса углерода в почве в условиях будущих изменений климата (за 2021–2050 гг.) для всех полей севооборота и для отдельного поля.

Климатические условия как текущие, так и ожидаемые влияют на формирование урожайности культур, баланс гумуса в почве и выделение CO_2 с полей севооборота.

Результаты и их обсуждение

Условия увлажнения и термический режим играют существенную роль в процессах превращения органических веществ в почве прежде всего из-за огромного влияния на продуктивность растительности и деятельность микроорганизмов, которые являются важнейшими биологическими факторами почвообразования.

Рассчитанные по сценариям изменения климата RCP4.5 и RCP8.5 на 2021–2050 гг. температурный режим и суммы осадков представлены на рис. 1 и 2.

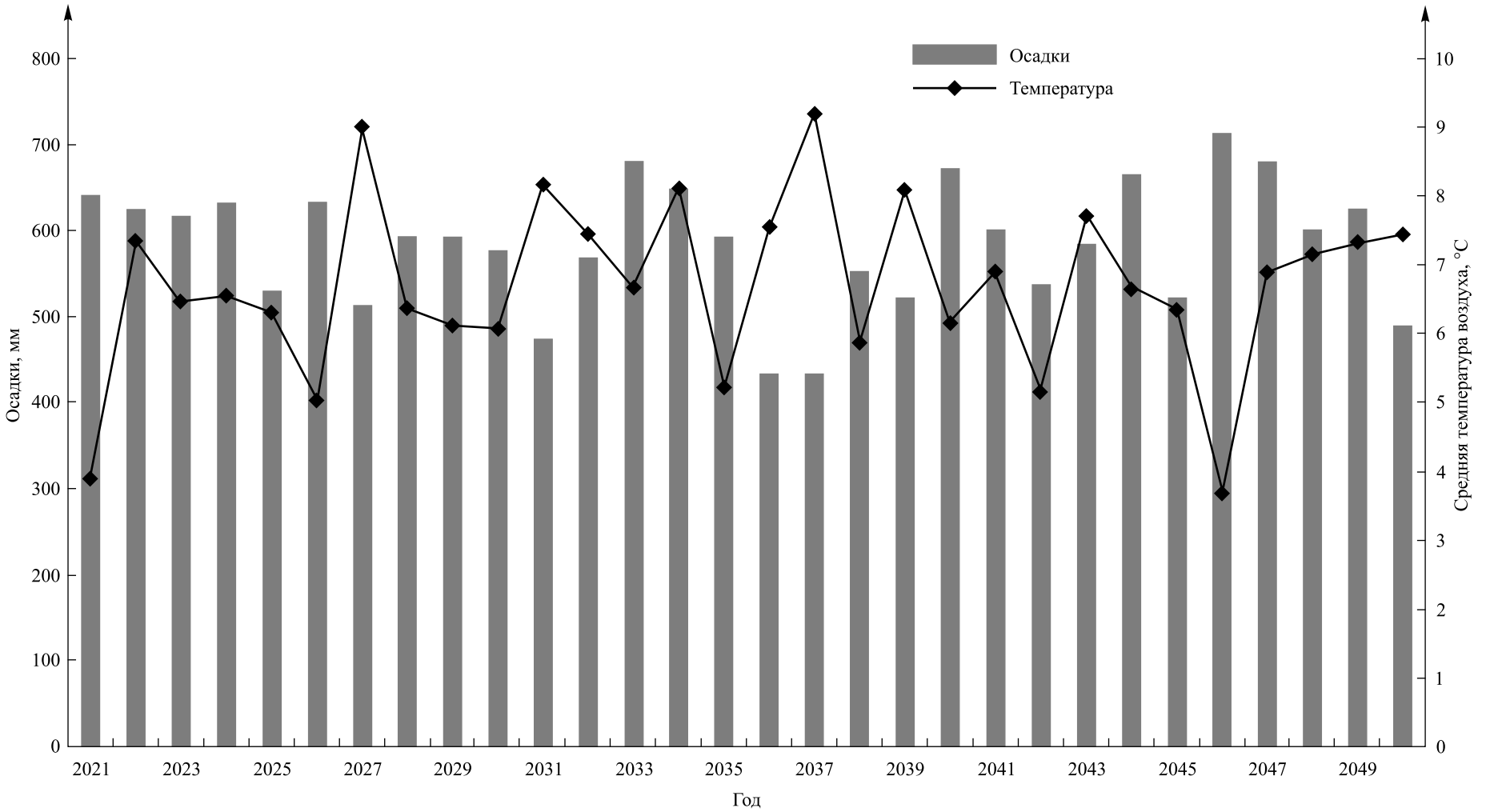

Рис. 1. Динамика ожидаемых годовых сумм осадков и средней годовой температуры воздуха (климатический сценарий RCP4.5)

Fig. 1. Dynamics of the expected annual rainfaills and middle for a year temperatures of air (climatic scenario of RCP4.5)

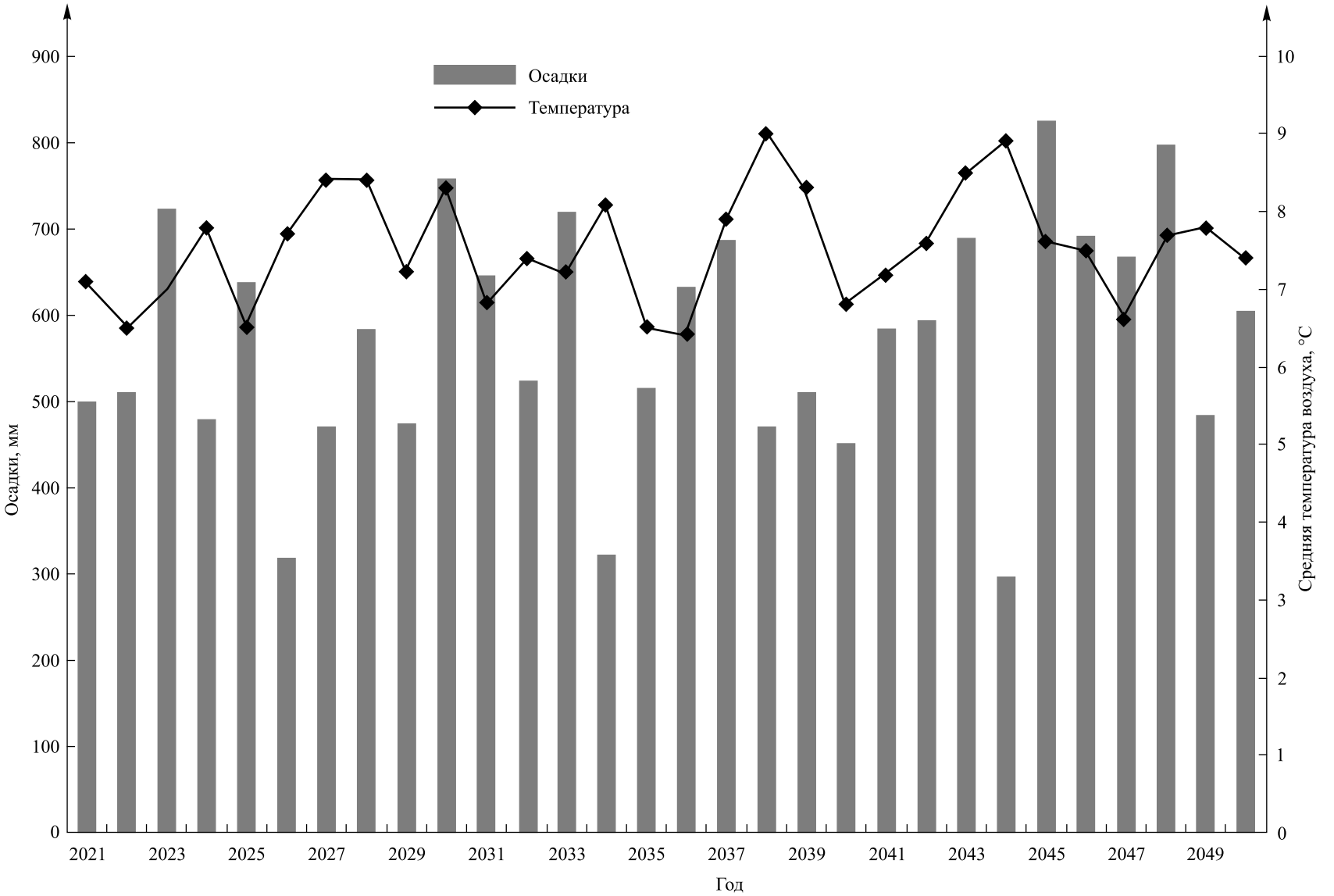

Рис. 2. Динамика ожидаемых годовых сумм осадков и средней годовой температуры воздуха (климатический сценарий RCP8.5)

Fig. 2. Dynamics of the expected annual rainfaills and middle for a year temperatures of air (climatic scenario of RCP8.5)

Ожидается, что по сценарию RCP4.5 среднее за рассматриваемый период годовое количество осадков будет равно 535 мм, т. е. 88 % от среднего многолетнего количества. При этом распределение осадков по годам будет очень неравномерным: предполагается, что в 5–6 годах из этих 30 лет годовая сумма осадков составит 50–65 % от базовой величины, не более чем в 16 годах прогнозируется на уровне 75–85 % и только в 8 годах достигнет 95–115 %.

Если сравнивать ожидаемые по климатическим сценариям суммы осадков, то следует отметить, что по сценарию RCP8.5 среднее за рассматриваемый период годовое количество осадков будет больше, чем по сценарию RCP4.5, и достигнет 574 мм, что равно 94 % от базовой величины.

По показателю увлажнения, которым выступает гидротермический коэффициент Селянинова (далее – ГТК), согласно климатическому сценарию RCP4.5 ожидается девять засушливых лет (рис. 3). Из них наибольшей засушливостью будут отличаться 2021 и 2046 гг., когда ГТК составит 0,58 и 0,52 отн. ед. соответственно, это означает, что вегетационные периоды этих лет характеризуются засухой средней интенсивности при средней за лето температуре воздуха 19,6 и 19,9 °С соответственно.

Вместе с тем по сценарию RCP8.5 увеличится количество лет с суммами осадков 48–52 % от базовой величины. По показателю увлажнения ожидается 10 засушливых лет (см. рис. 3). Причем особенно засушливыми будут 2026, 2034 и 2044 гг., когда значение ГТК составит 0,31; 0,58 и 0,52 отн. ед. соответственно.

Под влиянием погодных условий баланс углерода изменяется ежегодно в настоящее время и продолжит изменяться в будущем.

Характер динамики ожидаемых среднегодовых значений баланса углерода в почве при разных вариантах внесения удобрений в полевом десятипольном севообороте при реализации климатического сценария RCP4.5 представлен на рис. 4. Рассматривались три варианта расчета: 1) без внесения удобрений; 2) с внесением минеральных удобрений в дозе $N_{90}P_{90}K_{90}$; 3) с внесением навоза в количестве 18 т/га. Как видно из данных рис. 4, отрицательный среднегодовой баланс углерода ожидается в варианте без внесения удобрений: его значения будут колебаться от –0,120 до –0,379 тонны углерода на гектар (далее – т С $га^{-1}$). Наименьшие из них ожидаются в 2036, 2038, 2039, 2048–2050 гг. Средний за рассматриваемый период годовой баланс углерода в почве составит –0,250 т С $га^{-1}$.

Колебания баланса углерода в почве в варианте с внесением минеральных удобрений $N_{90}P_{90}K_{90}$ будут гораздо меньшими: от –0,184 до 0,101 т С $га^{-1}$. Причем в девяти годах ожидаются положительные значения. Средний за рассматриваемый период годовой баланс углерода в почве, так же как и в варианте без внесения удобрений, будет отрицательным, но существенно меньшим (на 0,219 т С $га^{-1}$) и составит –0,031 т С $га^{-1}$.

Баланс углерода в почве при внесении навоза в количестве 18 т/га ожидается положительный. Средний за рассматриваемый период годовой баланс достигнет 0,085 т С $га^{-1}$, однако будут два года – 2046-й и 2047-й, когда баланс углерода прогнозируется отрицательный. Предполагается, что эти годы будут характеризоваться самыми высокими среднегодовыми (8,5–8,9 °С) и средними за летний период (19,9 °С) температурами воздуха. Помимо этого, 2046 г. станет и самым засушливым.

При реализации климатического сценария RCP8.5 прослеживается чуть большее, чем при реализации сценария RCP4.5, увеличение годового баланса углерода. Это объясняется тем, что по сценарию RCP8.5 ожидаются более благоприятные условия тепло- и влагообеспеченности: температура воздуха будет несколько ниже средней многолетней, а количество осадков, особенно начиная с 2040 г., – выше среднего многолетнего.

Сопоставление данных рис. 1, 2 и 4 демонстрирует слабую положительную зависимость среднегодового баланса углерода в почве в полевом десятипольном севообороте от условий увлажнения за год.

Естественно, что под разными сельскохозяйственными культурами формируется только им присущий баланс углерода, а на рис. 4 приводятся осредненные по севообороту данные, в которых нивелируются особенности каждой полевой культуры. Если рассмотреть ожидаемый годовой баланс углерода на отдельном поле, например озимой пшеницы, то зависимость будет более отчетливо выраженной.

Улучшение режима увлажнения приведет к увеличению значения баланса углерода. Была рассчитана статистическая зависимость годового баланса углерода на поле с озимой пшеницей в десятипольном севообороте от количества осадков за июнь – август (вариант без внесения удобрений, сценарий RCP4.5). Связь характеризуется незначительным коэффициентом корреляции: $R = 0{,}349\,1$.

Следует также отметить, что при значительном количестве осадков даже в варианте без внесения удобрений ожидается слабоположительный баланс.

При сумме осадков за летние месяцы от 50 до 100 мм баланс углерода будет отрицательным и составит от –0,10 до –0,15 т С $га^{-1}$, а при суммарном количестве осадков за лето свыше 200 мм – положительным – в пределах 0–0,05 т С $га^{-1}$. В годы, когда сумма осадков ожидается более 220 мм, а средняя температура при этом будет снижена до 17,0–17,5 °С, годовой баланс углерода достигнет 0,12–0,13 т С $га^{-1}$.

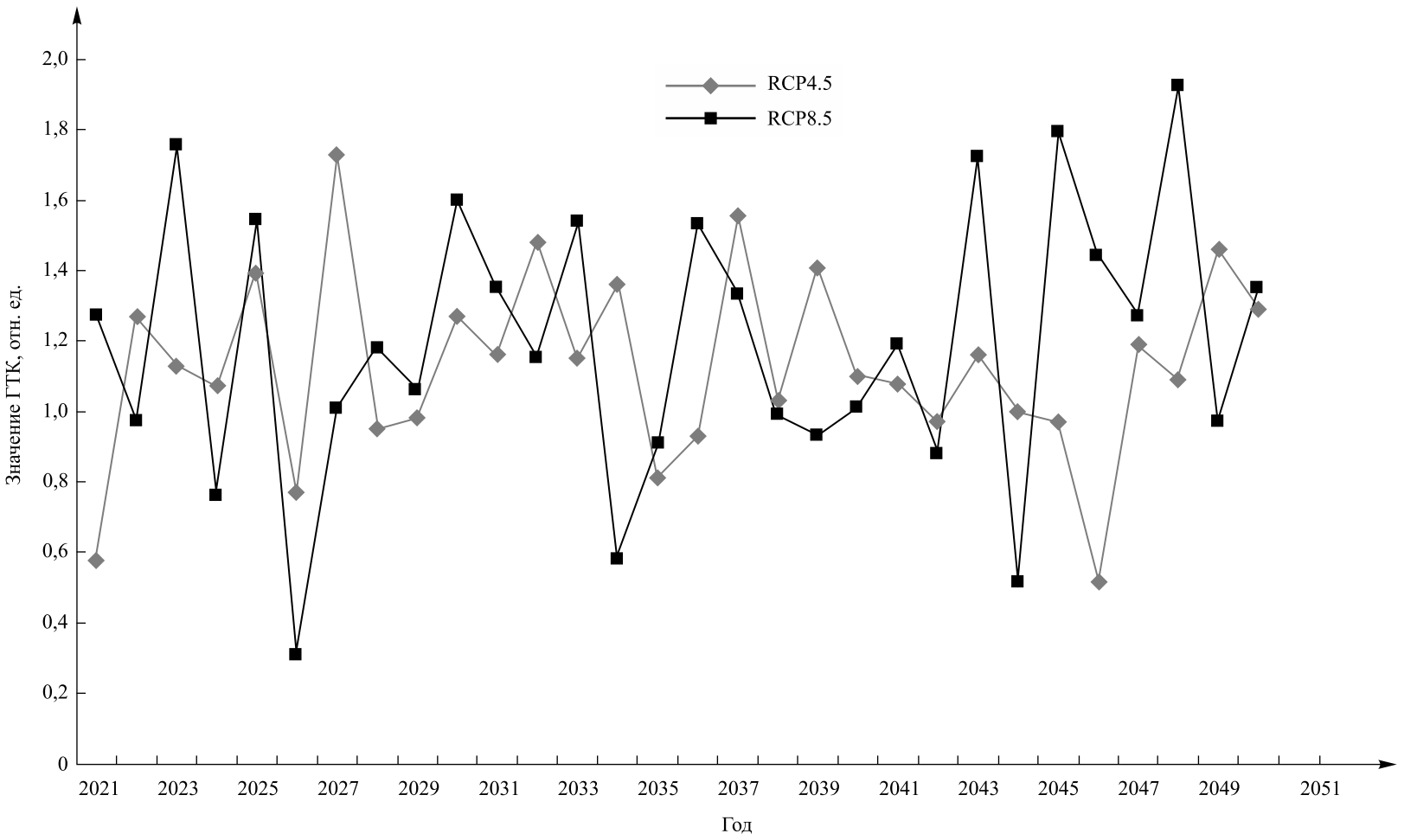

Рис. 3. Динамика ожидаемых значений ГТК
по климатическим сценариям RCP4.5 и RCP8.5

Fig. 3. Dynamics of the expected values of Selyaninov's hydrotermal coefficient
of moistening on the climatic scenarios of RCP4.5 and RCP8.5

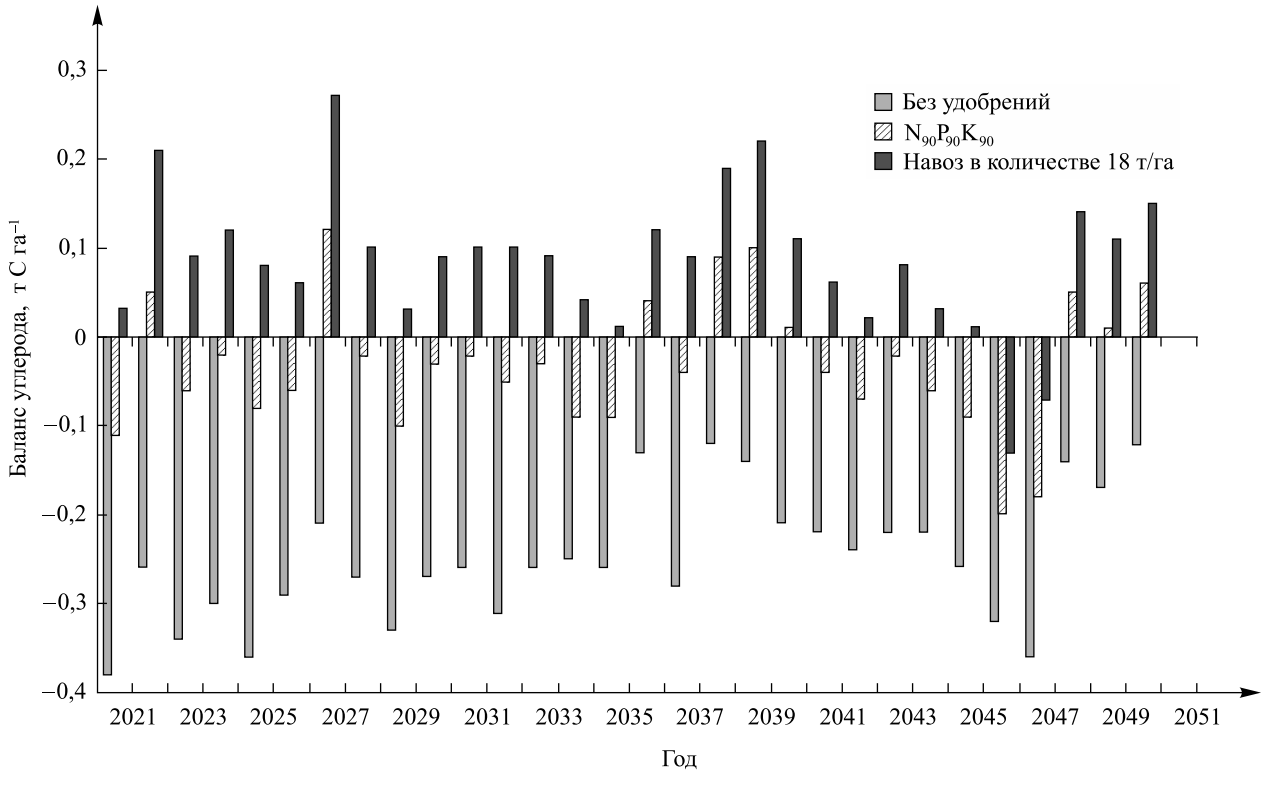

Рис. 4. Динамика среднегодовых значений баланса углерода в почве при разных вариантах внесения удобрений в десятипольном севообороте (климатический сценарий RCP4.5)

Fig. 4. Dynamics of average annual values of balance of carbon in soil at the different variants of top-dressing in a ten field crop rotation (climatic scenario of RCP4.5)

Режим увлажнения существенно влияет и на выделения углерода CO_2–C из почвы. Комплексным показателем оценки условий увлажнения является ГТК. Результат сопоставления ожидаемых по климатическому сценарию RCP4.5 (вариант без внесения удобрений) годовых сумм выделения углерода CO_2–C из почвы на поле с озимой пшеницей в десятипольном севообороте с условиями увлажнения представлен на рис. 5.

Как видно из данных рис. 5, наблюдается прямая зависимость годовых сумм выделения углерода CO_2–C из почвы от условий увлажнения вегетационного периода. С известной степенью осторожности можно отметить, что при значениях ГТК за вегетационный период 0,5–0,8 отн. ед. выделение углерода CO_2–C из почвы составляет 0,50–0,55 тонны выделений углерода CO_2–C на гектар (далее – т CO_2–C га$^{-1}$), повышение ГТК способствует увеличению выделений углерода, а при ГТК, равном 1,4–1,6 отн. ед., выделение углерода CO_2–C из почвы на поле с озимой пшеницей возрастает до 0,70–0,75 т CO_2–C га$^{-1}$.

Также был рассчитан ожидаемый баланс углерода на одном конкретном поле севооборота по десятилетиям (2021–2030, 2031–2040, 2041–2050) для трех вариантов опыта: 1) без внесения удобрений; 2) с внесением минеральных удобрений в дозах $N_{45}P_{45}K_{45}$ и $N_{90}P_{90}K_{90}$; 3) с внесением навоза порядка 9 и 18 т/га. Ожидаемые по климатическим сценариям осредненные по десятилетиям метеорологические условия приведены в таблице.

Метеорологические условия десятилетий по климатическим сценариям RCP4.5 и RCP8.5 отличаются температурным режимом и режимом увлажнения. Данные таблицы показывают, что температура воздуха по обоим сценариям ожидается ниже базовой величины. Здесь нет парадокса. Это объясняется тем, что интенсивное потепление климата началось в конце 1980-х гг., т. е. 1986–2005 гг., которые вошли в расчет базовой величины, пришлись на период потепления.

Меньшее по сравнению с базовой величиной количество осадков прогнозируется по сценарию RCP4.5 и для первых двух десятилетий по сценарию RCP8.5, несколько большим будет лишь среднегодовое значение в третьем десятилетии (2041–2050) по климатическому сценарию RCP8.5. Необходимо отметить, что по величине ГТК все три десятилетия по климатическому сценарию RCP4.5 ожидаются более засушливыми, чем по сценарию RCP8.5.

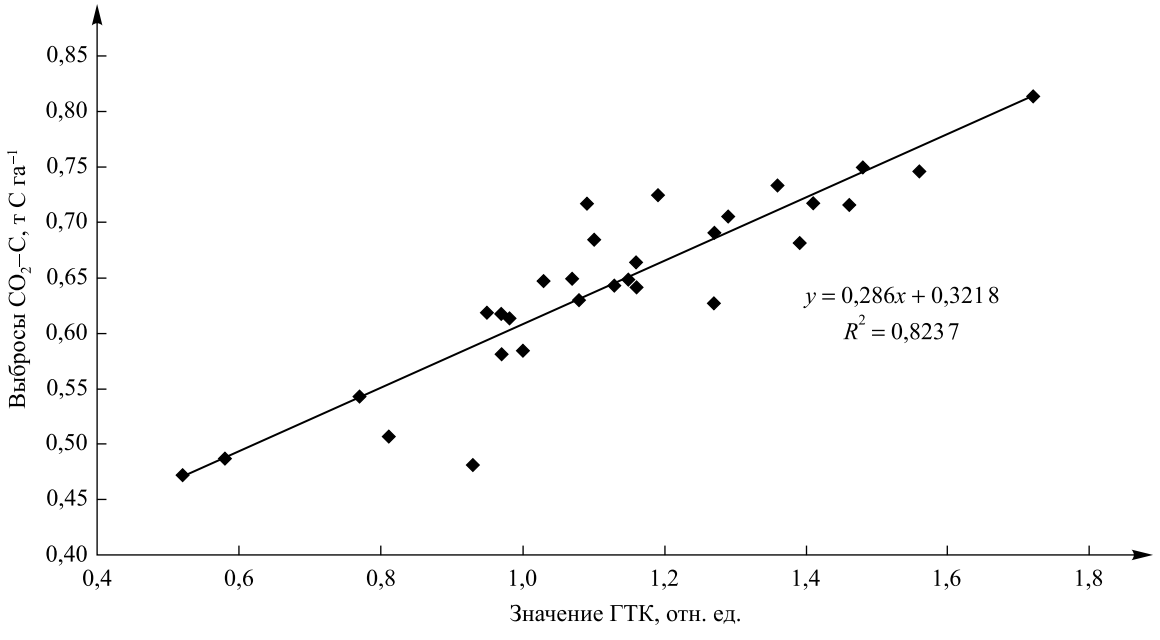

Рис. 5. Зависимость выбросов углерода CO_2–C на поле с озимой пшеницей в десятипольном севообороте от средних за вегетационный период значений ГТК (вариант без внесения удобрений, климатический сценарий RCP4.5)

Fig. 5. Dependence of extrass of carbon of CO_2–C on the field with a winter wheat in a ten field crop rotation from the mean for vegetation period values of coefficient of moistening of GTK (variant without top-dressing, climatic scenario of RCP4.5)

Ожидаемые по климатическим сценариям RCP4.5 и RCP8.5 метеорологические условия по десятилетиям

Expected on climatic scenarios RCP4.5 and RCP8.5 meteorological terms on decades

Годы	Средняя за десятилетие температура воздуха, °C		Среднее за десятилетие количество осадков, мм		Средний за десятилетие ГТК за вегетационный период, отн. ед.
	За июнь – август	За год	За июнь – август	За год	
Базовая величина					
1986–2005	18,8	8,0	250	611	1,30
Климатический сценарий RCP4.5					
2021–2030	17,8	7,4	157	505	1,11
2031–2040	17,8	7,0	188	579	1,05
2041–2050	18,3	7,5	166	522	1,07
Климатический сценарий RCP8.5					
2021–2030	17,5	7,5	181	544	1,14
2031–2040	18,1	7,4	192	547	1,13
2041–2050	17,9	7,7	198	632	1,30

Таким образом, на фоне этих метеорологических условий рассматривались динамика ожидаемых осредненных за десятилетия годовых значений баланса углерода в почве и выделение CO_2–C на конкретном поле севооборота.

Динамика прогнозируемых по сценариям RCP4.5 и RCP8.5 средних значений баланса углерода на одном конкретном поле представлена на рис. 6 и 7. При этом следует иметь в виду, что на этом поле в течение десятилетия чередуются все сельскохозяйственные культуры: клевер (сено) – озимая пшеница – сахарная свекла – кукуруза – горох – озимая пшеница – кукуруза – озимая пшеница – сахарная свекла – яровой ячмень. Предполагается, что они возделываются при разных вариантах внесения удобрений. Вполне закономерно, что годовой баланс углерода в почве и выбросы углерода на отдельном поле севооборота будут изменяться от десятилетия к десятилетию.

Наибольшие изменения годового баланса углерода в почве ожидаются в варианте без внесения удобрений. При этом его величина будет отрицательной и достаточно значительной (до –0,29… –0,44 т С $га^{-1}$). Общей закономерностью является увеличение годового баланса углерода почвы и выделения CO_2–С при переходе от одного варианта к другому (см. рис. 6 и 7): 1) без внесения удобрений; 2) с внесением минеральных удобрений в дозах $N_{45}P_{45}K_{45}$ и $N_{90}P_{90}K_{90}$; 3) с внесением органических удобрений в количестве 9 и 18 т/га.

В большинстве рассматриваемых вариантов годовой баланс углерода ожидается отрицательным, и только при внесении навоза порядка 18 т/га он будет положительным.

При реализации климатического сценария RCP8.5 наблюдается увеличение годового баланса углерода от первого к третьему десятилетию. Для климатического сценария RCP4.5 годовой баланс углерода в почве от периода 2021–2030 гг. к периоду 2041–2050 гг. тоже увеличивается. Для других вариантов расчета это прослеживается слабо.

Годовые значения выделения CO_2–С на отдельном поле севооборота (см. рис. 6 и 7) будут наименьшими в варианте без внесения удобрений (0,59–0,69 т CO_2–С $га^{-1}$). При внесении минеральных удобрений годовые значения выделения CO_2–С возрастают. Так, по климатическому сценарию RCP4.5 при внесении минеральных удобрений в дозе $N_{45}P_{45}K_{45}$ годовые значения выделений CO_2–С увеличиваются на 10–12 %, а в дозе $N_{90}P_{90}K_{90}$ – на 14–22 %.

Внесение органических удобрений значительно повышает интенсивность выделения CO_2–С с поля севооборота. При внесении навоза порядка 18 т/га ожидается наибольшая величина годовых выделений CO_2–С с поля севооборота, которая в 2,3–2,4 раза превысит выделения CO_2–С с неудобренного поля, что свидетельствует о высокой интенсивности минерализации органического вещества почвы.

Экспериментальные измерения баланса углерода в почве и эмиссии CO_2, выполненные в различных почвенно-климатических условиях, позволяют сопоставить полученные нами результаты моделирования с результатами других авторов.

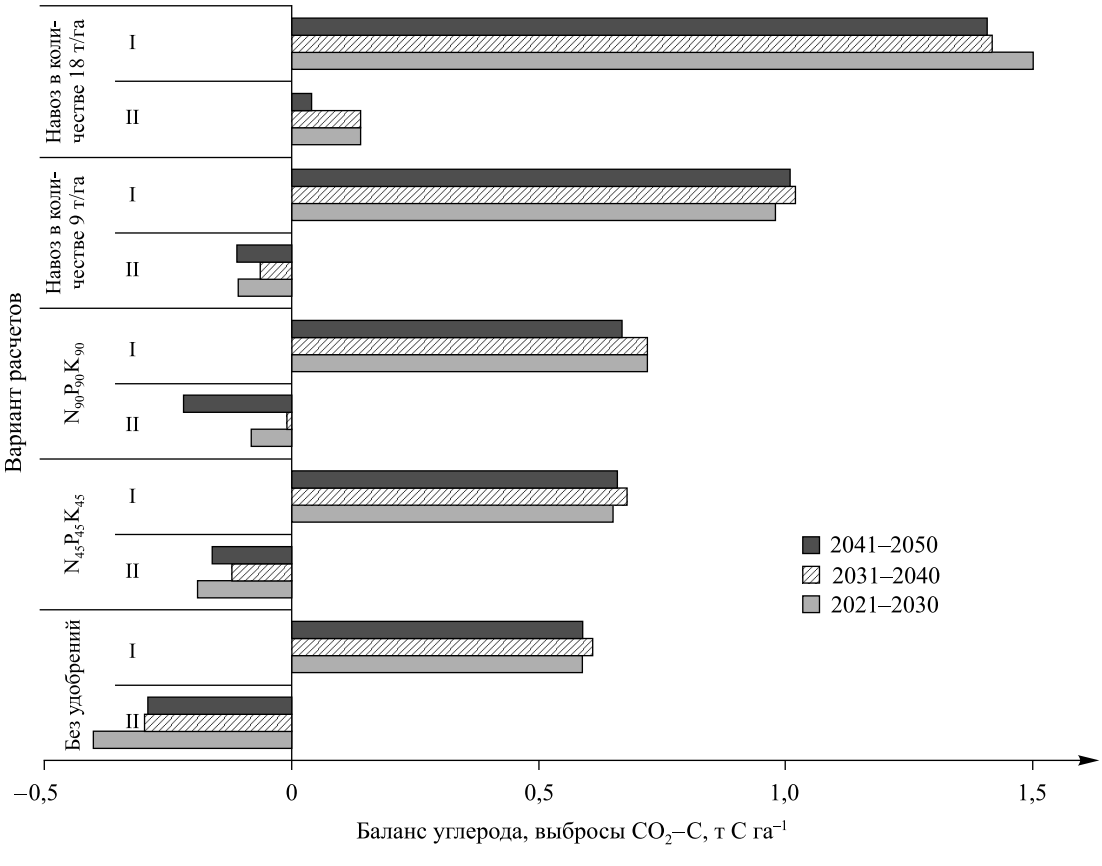

Рис. 6. Динамика ожидаемых средних по десятилетиям годовых значений баланса углерода и выбросов углерода CO_2–С на отдельном поле севооборота при разных вариантах внесения удобрений (климатический сценарий RCP4.5): I – выбросы CO_2–С; II – баланс углерода

Fig. 6. Dynamics of the expected mean on decades annual values balance of carbon and extrass of carbon of CO_2–С on the separate field of crop rotation at the different variants of top-dressing (climatic scenario of RCP4.5): I – extrass of CO_2–С; II – balance of carbon

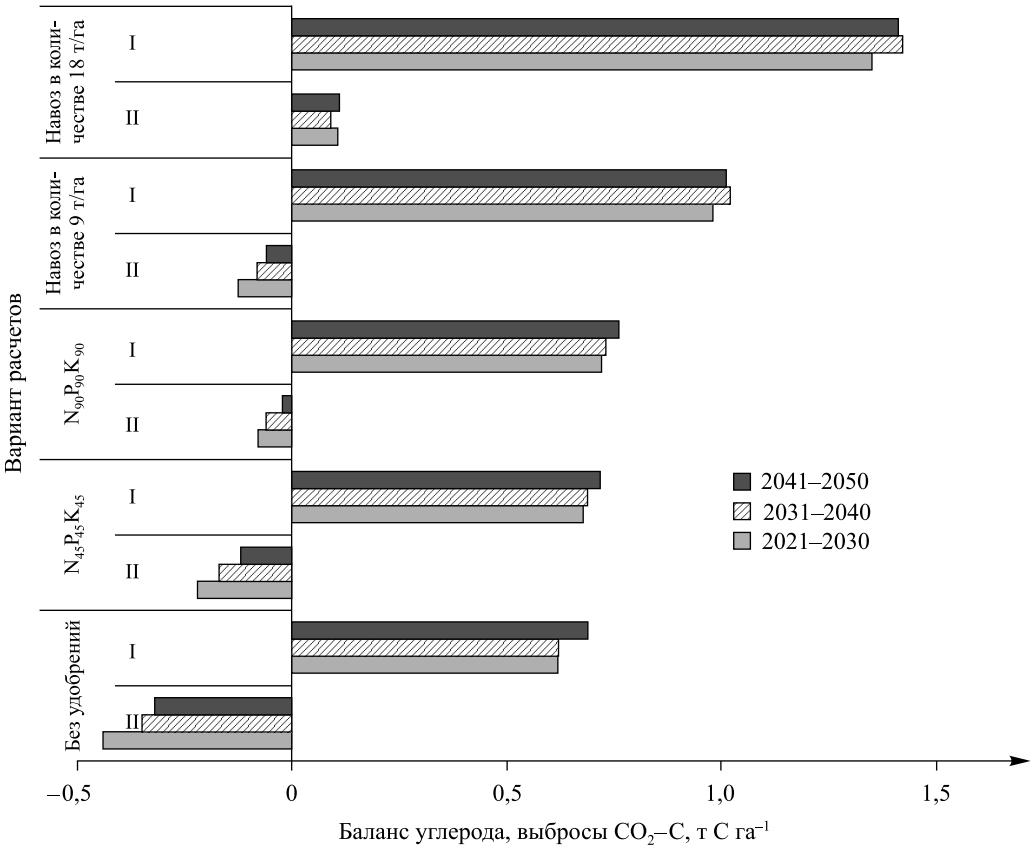

Рис. 7. Динамика ожидаемых средних по десятилетиям годовых значений баланса углерода и выбросов углерода CO_2-C на отдельном поле севооборота при разных вариантах внесения удобрений (климатический сценарий RCP8.5): I – выбросы CO_2-C; II – баланс углерода

Fig. 7. Dynamics of the expected mean on decades annual values of balance of carbon and extrass of carbon of CO_2-C on the separate field of crop rotation at the different variants of top-dressing (climatic scenario of RCP8.5): I – extrass of CO_2-C; II – balance of carbon

На основе огромного массива экспериментальных данных проводимых в США исследований в работе [14, p. 802] делается вывод о снижении содержания органического углерода в почве при повышении среднегодовой температуры воздуха от 5 до 17 °C, а также о положительном влиянии на баланс углерода в почве увеличения количества осадков от 200 до 1000 мм. Нами рассмотрены сценарные изменения среднегодовой температуры воздуха от 6 до 9 °C, при этом ожидается, что максимальный отрицательный баланс углерода будет наблюдаться в годы с наиболее высоким уровнем среднегодовых температур воздуха. Рост годовой суммы осадков от 300 до 800 мм обусловливает положительный баланс углерода в почве. Приведенные данные хорошо согласуются с результатами работы [14, p. 802].

В исследовании [23, p. 522] в условиях Европы поток эмиссии CO_2 из почвы под травянистой растительностью (пастбища) оценивается количеством 0,52 т CO_2-C га$^{-1}$ за год. Для пахотных земель наблюдается более высокое значение эмиссии CO_2 (0,84 т CO_2-C га$^{-1}$ за год). Близкие к приведенным оценки были получены и в наших расчетах. Однако они несколько отличаются в вариантах с внесением высокой дозы органических удобрений.

Выполненные в [24, с. 142] на черноземах Левобережной Украины многолетние измерения баланса углерода и эмиссии CO_2 из черноземной почвы под однолетними травами демонстрируют средние значения баланса углерода, равные –0,10… –0,13 т C га$^{-1}$, и величины потоков CO_2, равные 0,524–0,525 т CO_2-C га$^{-1}$ за год. Многолетние исследования [25, с. 110], проведенные во Владимирской области, показали, что продуцирование углекислого газа одной и той же культурой в разные годы варьирует в зависимости от гидротермических условий. Колебания между минимальным и максимальным выделением CO_2-C составляют 111–467 кг CO_2-C га$^{-1}$ для ячменя, 429–1356 кг/га для люпина, 141–1033 кг/га для пара, 792–1259 кг/га для озимой пшеницы, 521–883 кг/га для картофеля, 521–2321 кг/га для залежи. Для условий Литвы [26, p. 40] приводятся нелинейные зависимости выбросов CO_2 из почвы от температуры воздуха и влажности почвы, отмечается повышение эмиссии CO_2 с внесением удобрений.

В выполненных нами модельных расчетах годовые значения баланса углерода в почве и суммарных потоков эмиссии CO_2 меняются от года к году в зависимости от метеорологических условий и внесения удобрений и составляют от –0,4 до +0,2 т С $га^{-1}$ и от 0,6 до 1,5 т CO_2–С $га^{-1}$ за год соответственно. Они соотносятся с результатами экспериментальных измерений приведенных выше литературных источников.

Заключение

В целом за 2021–2050 гг. ожидается изменение показателей термического режима и условий увлажнения. По обоим сценариям предполагается 9–10 засушливых лет за рассматриваемый период.

Определены особенности влияния влаготемпературного режима на динамику органического углерода чернозема оподзоленного и выделений CO_2–С при различном внесении минеральных и органических удобрений под сельскохозяйственные культуры.

Показано, что улучшение режима увлажнения приведет к увеличению значения баланса углерода. Зависимость годового баланса углерода на поле с озимой пшеницей в десятипольном севообороте от количества осадков за лето (вариант без внесения удобрений) характеризуется коэффициентом корреляции 0,349. При сумме осадков от 50 до 100 мм баланс углерода будет отрицательным и составит –0,10…–0,15 т С $га^{-1}$. При суммарном количестве осадков за лето более 200 мм баланс ожидается положительный – в пределах 0–0,05 т С $га^{-1}$. В годы, когда сумма летних осадков превысит 220 мм, а средняя температура при этом снизится до 17,0–17,5 °С, годовой баланс углерода достигнет 0,12–0,13 т С $га^{-1}$.

Установлена прямая зависимость годовых сумм выделения углерода CO_2–С из почвы от условий увлажнения вегетационного периода. При значениях ГТК за вегетационный период 0,5–0,8 отн. ед. эмиссия углерода CO_2–С из почвы составит 0,50–0,55 т CO_2–С $га^{-1}$, при ухудшении условий увлажнения повышение ГТК способствует увеличению выделений углерода, а при ГТК, равном 1,4–1,6 отн. ед., выделение углерода CO_2–С из почвы на поле с озимой пшеницей возрастет до 0,70–0,75 т CO_2–С $га^{-1}$.

Отмечено, что наибольшие изменения годового баланса углерода в почве ожидаются в варианте без внесения удобрений. При этом его величина будет отрицательной и достаточно значительной (до –0,29…–0,44 т С $га^{-1}$). Общей закономерностью является увеличение годового баланса углерода почвы и выделения CO_2–С при переходе от одного варианта внесения удобрений к другому и наращивании дозы (от минеральных удобрений $N_{45}P_{45}K_{45}$ к органическим порядка 18 т/га). В большинстве рассматриваемых вариантов годовой баланс углерода ожидается отрицательным, и только в варианте внесения органических удобрений в количестве 18 т/га он будет положительным.

В условиях изменения климата прослеживается увеличение годового баланса углерода и годовых сумм выделения углерода CO_2–С из почвы от первого (2021–2030) ко второму (2031–2040) и третьему (2041–2050) десятилетиям рассматриваемого периода.

Приведенные материалы показывают, что под влиянием погодных условий баланс углерода и эмиссия CO_2–С изменяются ежегодно на современном этапе и продолжат изменяться в будущем. При этом значение баланса углерода и выделения CO_2–С будут находиться в гораздо большей зависимости от условий увлажнения, чем от температуры воздуха и почвы. Улучшение условий увлажнения приводит к значительному повышению выделения CO_2–С с полей севооборота. Длительное применение различных систем удобрений оказывает значительное положительное влияние на баланс углерода и выделения CO_2–С.

Библиографические ссылки

1. Трус ОМ, Господаренко ГМ, Прокопчук ІВ. *Гумус чорнозему опідзоленого та його відтворення.* Умань: Сочінський М. М.; 2016. 227 с.

2. Brock C, Franko U, Oberholzer H-R, Kuka K, Leithold G, Kolbe H, et al. Humus balancing in Central Europe – concepts, state of the art, and further challenges. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science.* 2013;176(1):3–11. DOI: 10.1002/jpln.201200137.

3. Karmakar R, Das I, Dutta D, Rakshit A. Potential effects of climate change on soil properties: a review. *Science International.* 2016;4(2):51–73. DOI: 10.17311/sciintl.2016.51.73.

4. Parton WJ, Scurlock JMO, Ojima DS, Schimel DS, Hall DO. Scopegram group members. Impact of climate change on grassland production and soil carbon worldwide. *Global Change Biology.* 1995;1(1):13–22. DOI: 10.1111/j.1365-2486.1995.tb00002.x.

5. Grace PR, Post WM, Hennessy K. The potential impact of climate change on Australia's soil organic carbon resources. *Carbon Balance and Management.* 2006;10:1–14. DOI: 10.1186/1750-0680-1-14.

6. Davidson EA, Janssens IA. Temperature sensitivity of soil carbon decomposition and feedbacks to climate change. *Nature.* 2006; 440:165–173. DOI: 10.1038/nature04514.

7. Smith J, Smith P, Wattenbach M, Zaehle S, Hiederer R, Jones RJA, et al. Projected changes in mineral soil carbon of European croplands and grasslands, 1990–2080. *Global Change Biology.* 2005;11(12):2141–2152. DOI: 10.1111/j.1365-2486.2005.001075.x.

8. Zaehle S, Bondeau A, Carter TR, Cramer W, Erhard M, Prentice IC, et al. Projected changes in terrestrial carbon storage in Europe under climate and land-use change, 1990–2100. *Ecosystems.* 2007;10(3):380–401. DOI: 10.1007/s10021-007-9028-9.

9. Muñoz-Rojas M, Jordán A, Zavala LM, González-Peñaloza FA, De la Rosa D, Pino-Mejias R, et al. Modelling soil organic carbon stocks in global change scenarios: a CarboSOIL application. *Biogeosciences.* 2013;10(12):8253–8268. DOI: 10.5194/bg-10-8253-2013.

10. *Assessment of Climate Change for the Baltic Sea Basin.* Berlin: Springer-Verlag; 2008. 474 p. (Regional Climate Studies).

11. Ozturk I, Sharif B, Baby S, Jabloun M, Olesen JE. Long-term simulation of temporal change of soil organic carbon in Denmark: comparison of three model performances under climate change. *The Journal of Agricultural Science.* 2018;156(2):139–150. DOI: 10.1017/S0021859617000971.

12. Petersen BM, Knudsen MT, Hermansen JE, Halberg N. An approach to include soil carbon changes in life cycle assessments. *Journal of Cleaner Production.* 2013;52:217–224. DOI: 10.1016/j.jclepro.2013.03.007.

13. Van Veen JA, Paul EA. Organic carbon dynamics in grassland soils. l. Background information and computer simulation. *Canadian Journal of Soil Science.* 1981;61(2):185–201. DOI: 10.4141/cjss81-024.

14. Burke IC, Yonker CM, Parton WJ, Cole CV, Schimel DS, Flach K. Texture, climate, and cultivation effects on soil organic matter content in U. S. grassland soils. *Soil Science Society of America Journal.* 1989;53(3):800–805. DOI: 10.2136/sssaj1989.03615995005300030029x.

15. Leite LFC, Doraiswamy PC, Causarano HJ, Gollany HT, Milak S, Mendonca ES. Modeling organic carbon dynamics under no-tillage and plowed systems in tropical soils of Brazil using CQESTR. *Soil & Tillage Research.* 2009;102(1):118–125. DOI: 10.1016/ j.still.2008.08.003.

16. Fayiga AO, Saha UK. Effect of climate change on soil productivity in developing countries. *Asian Journal of Environment & Ecology.* 2017;4(1):1–22. DOI: 10.9734/AJEE/2017/35485.

17. Abberton M, Conant R, Batello C, editors. *Grassland carbon sequestration: management, policy and economics. Proceedings of the Workshop on the role of grassland carbon sequestration in the mitigation of climate change; 2019 April; Rome, Italy.* Rome: FAO; 2010. 338 p. (Integrated Crop Management; volume 11–2010).

18. Степаненко СМ, Польовий АМ, редактори. *Кліматичні ризики функціонування галузей економіки України в умовах зміни клімату.* Одеса: ТЕС; 2018. 548 с.

19. Coleman K, Jenkinson DS. RothC-26.3 – a model for the turnover of carbon in soil. In: Powlson DS, Smith P, Smith JU, editors. *Evaluation of soil organic matter models: using existing long-term datasets.* Berlin: Springer-Verlag; 1996. p. 237–246. (NATO ASI Series I; volume 38).

20. Полевой АН. Теория и расчет продуктивности сельскохозяйственных культур. Ленинград: Гидрометеоиздат; 1983. 175 с.

21. Господаренко ГМ, Трус ОМ, Прокопчук ІВ. Умови збереження вмісту гумусу в ґрунті польової сівозміни. *Біологічні системи.* 2012;4(1):31–34.

22. Новиков АА, Кисаров ОП. Обоснование роли корневых и пожнивных остатков в агроценозах. *Научный журнал Кубанского государственного аграрного университета* [Интернет]. 2012 [процитировано 1 февраля 2019 г.];78(04). Доступно по: http://ej.kubagro.ru/2012/04/pdf/36.pdf.

23. Vleeshouwers LM, Verhagen A. Carbon emission and sequestration by agricultural land use: a model study for Europe. *Global Change Biology.* 2002;8(6):519–530. DOI: 10.1046/j.1365-2486.2002.00485.x.

24. Сябрук ОП. Оцінка втрат вуглецю з чорнозему типового за різних способів обробітку та систем удобрення. У: *Агрохімія і ґрунтознавство. Випуск 80.* Харків: ІГА імені О. Н. Соколовського; 2013. с. 140–146.

25. Шилова НА. Динамика выделения CO_2 в посевах полевых культур на дерново-подзолистых и торфяных почвах. *Почвоведение и агрохимия.* 2014;1:104–113.

26. Feizienė D, Kadžienė G. The influence of soil organic carbon, moisture and temperature on soil surface CO_2 emission in the 10th year of different tillage-fertilisation management. *Zemdirbyste-Agriculture.* 2008;95(4):29–45.

References

1. Trus OM, Gospodarenko GM, Prokopchuk IV. *Gumus chornozemu opidzolenogo ta jogo vidtvorennja* [Humus of black soils and his recreation]. Uman: Sochins'kyj M. M.; 2016. 227 p. Ukrainian.

2. Brock C, Franko U, Oberholzer H-R, Kuka K, Leithold G, Kolbe H, et al. Humus balancing in Central Europe – concepts, state of the art, and further challenges. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science.* 2013;176(1):3–11. DOI: 10.1002/jpln.201200137.

3. Karmakar R, Das I, Dutta D, Rakshit A. Potential effects of climate change on soil properties: a review. *Science International.* 2016;4(2):51–73. DOI: 10.17311/sciintl.2016.51.73.

4. Parton WJ, Scurlock JMO, Ojima DS, Schimel DS, Hall DO. Scopegram group members. Impact of climate change on grassland production and soil carbon worldwide. *Global Change Biology.* 1995;1(1):13–22. DOI: 10.1111/j.1365-2486.1995.tb00002.x.

5. Grace PR, Post WM, Hennessy K. The potential impact of climate change on Australia's soil organic carbon resources. *Carbon Balance and Management.* 2006;10:1–14. DOI: 10.1186/1750-0680-1-14.

6. Davidson EA, Janssens IA. Temperature sensitivity of soil carbon decomposition and feedbacks to climate change. *Nature.* 2006;440:165–173. DOI: 10.1038/nature04514.

7. Smith J, Smith P, Wattenbach M, Zaehle S, Hiederer R, Jones RJA, et al. Projected changes in mineral soil carbon of European croplands and grasslands, 1990–2080. *Global Change Biology.* 2005;11(12):2141–2152. DOI: 10.1111/j.1365-2486.2005.001075.x.

8. Zaehle S, Bondeau A, Carter TR, Cramer W, Erhard M, Prentice IC, et al. Projected changes in terrestrial carbon storage in Europe under climate and land-use change, 1990–2100. *Ecosystems.* 2007;10(3):380–401. DOI: 10.1007/s10021-007-9028-9.

9. Muñoz-Rojas M, Jordán A, Zavala LM, González-Peñaloza FA, De la Rosa D, Pino-Mejias R, et al. Modelling soil organic carbon stocks in global change scenarios: a CarboSOIL application. *Biogeosciences.* 2013;10(12):8253–8268. DOI: 10.5194/bg-10-8253-2013.

10. *Assessment of Climate Change for the Baltic Sea Basin.* Berlin: Springer-Verlag; 2008. 474 p. (Regional Climate Studies).

11. Ozturk I, Sharif B, Baby S, Jabloun M, Olesen JE. Long-term simulation of temporal change of soil organic carbon in Denmark: comparison of three model performances under climate change. *The Journal of Agricultural Science.* 2018;156(2):139–150. DOI: 10.1017/S0021859617000971.

12. Petersen BM, Knudsen MT, Hermansen JE, Halberg N. An approach to include soil carbon changes in life cycle assessments. *Journal of Cleaner Production.* 2013;52:217–224. DOI: 10.1016/j.jclepro.2013.03.007.

13. Van Veen JA, Paul EA. Organic carbon dynamics in grassland soils. l. Background information and computer simulation. *Canadian Journal of Soil Science.* 1981;61(2):185–201. DOI: 10.4141/cjss81-024.

14. Burke IC, Yonker CM, Parton WJ, Cole CV, Schimel DS, Flach K. Texture, climate, and cultivation effects on soil organic matter content in U. S. grassland soils. *Soil Science Society of America Journal.* 1989;53(3):800–805. DOI: 10.2136/sssaj1989.03615995005300030029x.

15. Leite LFC, Doraiswamy PC, Causarano HJ, Gollany HT, Milak S, Mendonca ES. Modeling organic carbon dynamics under no-tillage and plowed systems in tropical soils of Brazil using CQESTR. *Soil & Tillage Research.* 2009;102(1):118–125. DOI: 10.1016/ j.still.2008.08.003.

16. Fayiga AO, Saha UK. Effect of climate change on soil productivity in developing countries. *Asian Journal of Environment & Ecology.* 2017;4(1):1–22. DOI: 10.9734/AJEE/2017/35485.

17. Abberton M, Conant R, Batello C, editors. *Grassland carbon sequestration: management, policy and economics. Proceedings of the Workshop on the role of grassland carbon sequestration in the mitigation of climate change; 2019 April; Rome, Italy.* Rome: FAO; 2010. 338 p. (Integrated Crop Management; volume 11–2010).

18. Stepanenko SM, Polevoy AN, editors. *Klimatychni ryzyky funkcionuvannja galuzej ekonomiky Ukrai'ny v umovah zminy klimatu* [Climatic risks of functioning of industries of economy of Ukraine in the conditions of change of climate]. Odessa: TES; 2018. 548 p. Ukrainian.

19. Coleman K, Jenkinson DS. RothC-26.3 – a model for the turnover of carbon in soil. In: Powlson DS, Smith P, Smith JU, editors. *Evaluation of soil organic matter models: using existing long-term datasets.* Berlin: Springer-Verlag; 1996. p. 237–246. (NATO ASI Series I; volume 38).

20. Polevoy AN. *Teoriya i raschet produktivnosti sel'skokhozyaistvennykh kul'tur* [Theory and calculation of the productivity of agricultural cultures]. Leningrad: Gidrometeoizdat; 1983. 175 p. Russian.

21. Hospodarenko HM, Trus OM, Prokopchuk IV. Conditions of conservation of humus content in a field crop rotation. *Biologichni systemy.* 2012;4(1):31–34. Ukrainian.

22. Novikov AA, Kisarov OP. Statements for the role of root and aftermath residues in agrocenoses. *Nauchnyi zhurnal Kubanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta* [Internet]. 2012 [cited 2019 February 1];78(04). Available from: http://ej.kubagro.ru/2012/04/pdf/36.pdf. Russian.

23. Vleeshouwers LM, Verhagen A. Carbon emission and sequestration by agricultural land use: a model study for Europe. *Global Change Biology.* 2002;8(6):519–530. DOI: 10.1046/j.1365-2486.2002.00485.x.

24. Syabruk OP. Estimation of carbon losses from chernozem typical under different soil tillage and fertilization systems. In: *Agrochemistry and Soil Science. Issue 80.* Kharkiv: Institute for Soil Science and Agrochemistry Research named after O. N. Sokolovsky; 2013. p. 140–146. Ukrainian.

25. Shilova NA. Dynamics of allocation CO_2 in crops of field cultures on sod-podzolic and peat soils. *Pochvovedenie i agrokhimiya.* 2014;1:104–113. Russian.

26. Feizienė D, Kadžienė G. The influence of soil organic carbon, moisture and temperature on soil surface CO_2 emission in the 10th year of different tillage-fertilisation management. *Zemdirbyste-Agriculture.* 2008;95(4):29–45.

Статья поступила в редколлегию 24.02.2019.
Received by editorial board 24.02.2019.