

Агрочововедение и агроэкология

УДК 631.4:631.8:631.17

DOI: 10.31857/S2500262722030085, EDN: GCRTOF

АГРОТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ПОТЕНЦИАЛ УПРАВЛЕНИЯ ОРГАНИЧЕСКИМ УГЛЕРОДОМ ЧЕРНОЗЁМОВ ОБЫКНОВЕННЫХ В ЗЕРНОПАРОПРОПАШНОМ СЕВОБОРОТЕ**И.Т. Хусниев¹, В.А. Романенков^{1,2}, доктор биологических наук, С.В. Пасько³, кандидат сельскохозяйственных наук, И.А. Ильичёв¹**¹Факультет почвоведения МГУ имени М.В.Ломоносова, 119991, Москва, Ленинские горы, 1, стр.12
E-mail: husniev.ilshat@gmail.com²ВНИИ агрохимии имени Д.Н. Прянишникова, 127550, Москва, ул. Прянишникова, 31 а
E-mail: romanenkov@soil.msu.ru³Федеральный Ростовский аграрный научный центр, 346735, Ростовская обл., Аксайский район, пос. Рассвет, ул. Институтская, 1

Исследование проводили с целью оценки агротехнологического потенциала управления органическим углеродом пахотной почвы – чернозёма обыкновенного среднемоющего мицеллярно-карбонатного тяжёлосуглинистого. Работу выполняли в длительном эксперименте Географической сети полевых опытов с удобрениями, zaloженном в 1974 г. Федеральным Ростовским аграрным научным центром. Изучали динамику органического углерода в трёх контрастных вариантах опыта в течение пяти ротаций – за 40-летний период. По экспериментальным данным за 1975–2011 гг. с помощью динамического моделирования воспроизведена месячная динамика запасов органического углерода в каждом варианте опыта до 2020 г. Во всех вариантах опыта модель описывает наблюдаемое снижение запасов органического углерода после прохождения пяти ротаций севооборота. При этом на фоне органо-минеральной системы удобрения в течение первых трёх ротаций происходило увеличение запасов С. Однако затем накопленный углерод был потерян, что указывает на неравновесность запасов и значительную их зависимость от продуктивности севооборота, что проявляется даже при прохождении одной ротации. При этом межгодовая изменчивость за девятилетнюю ротацию могла превышать 4 т/га, или около 5 % от общих запасов. На основании моделирования установлено, что необходимое для поддержания запасов органического углерода в пахотном слое почвы поступление С с растительными остатками составляет в среднем 3,87 т/га в год. Ежегодное накопление органического углерода в размере 0,4 % от первоначальных запасов 88 т/га в первое двадцатилетие обеспечивало совместное внесение наиболее высоких доз минеральных и органических удобрений. Стратегия «4 промилле» может быть реализована в чернозёме обыкновенном в условиях рассматриваемого опыта при ежегодном поступлении 4,3...5,7 т/га С растительных остатков. Внесение высоких доз органических удобрений, обеспечивающих названную продуктивность, – необходимый компонент поддержания и увеличения запасов органического углерода в почвах.

AGROTECHNOLOGICAL POTENTIAL OF ORGANIC CARBON MANAGEMENT IN CHERNOZEMS IN GRAIN-FALLOW CROP ROTATION**Khusniev I.T.¹, Romanenkov V.A.^{1,2}, Pasko S.V.³, Ilyichev I.A.¹**¹Faculty of Soil Science, Lomonosov Moscow State University, 119991, Moskva, Leninskie gory, 1, str.12
E-mail: husniev.ilshat@gmail.com²All-Russian Research Institute of Agrochemistry named after D.N. Pryanishnikov, 127550, Moskva, ul. Priyanishnikova, 31 а
E-mail: romanenkov@soil.msu.ru³Federal Rostov Agricultural Research Center, 346735, Rostovskaya obl., Aksaiskii r-n, pos. Rassvet, ul. Institutskaya, 1

Assessment of the agrotechnological potential of organic carbon management in arable soil – chernozems, medium thick micellar-carbonate heavy loamy. Object of research: long-term experience of the Geographical network of long-term field experiments with fertilizers, founded in 1974 by the Federal Rostov Agricultural Research Center. The dynamics of organic carbon was studied in three contrasting variants of the experiment during five rotations – over a 40-year period. According to experimental data 1975–2011, using dynamic modeling, the monthly dynamics of organic carbon stocks in each variant of the experiment until 2020 was reproduced. Results: In all variant of the experiment, the model describes the observed decrease in organic carbon stocks after five crop rotations. At the same time, in the variants with an organo-mineral fertilizer system, during the first three rotations, an increase in C reserves was observed, but then the accumulated C was lost, which indicates a non-equilibrium of reserves and a significant dependence on crop rotation productivity, manifested even during the passage of one of the crop rotations. At the same time, the interannual variability for a nine-year rotation could be more than 4 t/ha, or about 5% of the total C stock. Based on the modeling, it was found that the C input with plant residues necessary to maintain organic carbon reserves in the arable soil layer is on average 3.87 t/ha per year. The annual accumulation of organic carbon in the amount of 0.4% from the initial reserves of 88 t/ha was ensured in the first twenty years with the combined use of the highest doses of mineral and organic fertilizers. The strategy of 4 ppm can be implemented in the chernozems of the study experiment with an annual input of 4.3–5.7 t/ha C of plant residues. The introduction of high doses of organic fertilizers, which provide the mentioned productivity, is a necessary component for maintaining and increasing the stocks of organic carbon in soils.

Ключевые слова: запас органического углерода, чернозём, «четыре промилле», длительный полевой опыт, органические удобрения.**Key words:** stock of organic carbon, chernozems, 4 ppm, long-term field experiments, organic fertilizers.

В природных и агроэкосистемах круговорот и запасы органического углерода в почве определяются множеством факторов [1], подверженных влиянию человека и глобальным климатическим изменениям [2]. Запас С – один из основных показателей почвенного плодородия и здоровья почвы, а его сохранение – условие устойчивого состояния агроэкосистем. На Парижской конференции по климату (COP 21) в 2015 г. была предложена программа «Инициатива 4 промилле», цель которой заключается в увеличении содержания органического углерода в культивируемых почвах на 4 % в год для компенсации выбросов парниковых газов и обеспечения постоянства концентрации углерода в атмосфере [3]. Практические механизмы реагирования на эти инициативы должны быть разработаны на региональном и местном уровне [4].

Как правило, в почвах с низким содержанием органического углерода его запасы могут быстро увеличиваться при смене агротехнологий или их элементов [5, 6]. Почвы с исходно высокой величиной этого показателя обладают значительно меньшими возможностями для накопления органического С, даже при последовательном применении углеродсеквестрирующих технологий. В чернозёмах, составляющих большую часть пахотного фонда страны, чаще удаётся стабилизировать его запас или снизить потери, например, при минимализации обработки почвы, чем обеспечить длительный процесс увеличения запасов [7, 8, 9].

Так, для чернозёма ортик отмечали накопление органического углерода в верхнем слое 0...15 см при введении обработки почвы No-till в течение 11 лет. При этом скорость процесса составляла 400...500 кг/га в год [10]. В другой работе, в чернозёме калык в течение 77 лет после прекращения обработки пашни и восстановления степной растительности содержание С в слое 0...10 см возросло в 1,4 раза [11]. Необходимо отметить, что в первом случае запас С в начале опыта составлял 27 т/га, во втором – не более 25 т/га, если исходить из содержания С – 1,97 %.

Согласно данным обзора Minasny et al. [3], цель накопления 4 % в год может быть достижима при начальных запасах С почвы менее 80 т/га. Это близко к исходному уровню или даже превышает его для полевого опыта ВНИИ сахара и сахарной свёклы на выщелоченном чернозёме. В этом эксперименте накопление С почвы наблюдали только в 7 из 62 лет, рассчитанное ежегодное поступление С с растительными остатками для накопления не менее 4 % должно составлять 2400 кг/год [12].

В этой связи весьма информативны результаты моделирования, проведённого Rolinski et al. [13] для территории освоенных целинных земель России и Казахстана, северная часть которых представлена чернозёмами. Моделирование для почвенного слоя 0...300 см при условии вывода земель из сельскохозяйственного оборота показывает, что для сценария будущего климата СМIP3 [14] запасы С почвы постепенно возрастают при его начальном содержании 150 т/га. При начальном содержании С 220 т/га запасы его убывают до 2070 г., а затем стабилизируются на равновесном уровне. При начальном содержании С 400 т/га запасы органического углерода, динамика которых во всех почвах смоделирована до 2100 г., постоянно убывают. Очевидно, что решающим фактором были начальные запасы С, максимальные величины которых оценены авторами в 40...50 т/га в слое 0...20 см в 1985–1995 гг. В этом случае при выводе пахотных земель из сельскохозяйственного оборота не происходит секвестрации С. При запасах С почвы 20 т/га секвестрация оказывается значительной (в среднем 0,86 кг/м²

в год). В работе Kurganova et al. [15] для той же территории, продолжительность накопления почвенного углерода до достижения нового состояния равновесия при постагрогенной эволюции чернозёмов оценивается в 30...40 лет.

Интенсивность процессов фиксации углерода будет зависеть и от степени выпашанности почвы. По оценкам Minnikova et al. [16], на территории проведения обсуждаемого в статье длительного полевого опыта, среди пахотных почв преобладают карбонатно-мицеллярные чернозёмы с запасами С в слое 0...30 см 83,6 ± 1,4 т/га. Эти величины близки к запасам С на начало опыта 88 т/га, что подтверждает влияние длительного использования участка под пашню перед закладкой опыта на потери почвенного углерода. В пахотных карбонатно-мицеллярных чернозёмах потери составляют около 1/3 от запасов органического углерода нативных почв. Близкие цифры приведены и в работе Черновой и др. [8], где потери С чернозёмами Ростовской области в пределах Предкавказской провинции за 50...60 лет распашки из слоя 0...25 см оценены в 25...40 %.

Методика. Исследования проводили в длительном эксперименте Географической сети длительных полевых опытов с удобрениями «Эффективность минеральных и органических удобрений в зависимости от насыщенности ими севооборота», заложенном в 1974 г. на базе Федерального Ростовского аграрного научного центра. Опытное поле расположено в центральной части Ростовской области вблизи поселка Рассвет Аксайского района в 20 км от берега реки Дон на водораздельном плато. Высота поверхности над уровнем моря 250 м.

Климат территории умеренно континентальный. Среднегодовое количество осадков 429 мм. Средне-многолетняя сумма температур воздуха выше 10 °С составляет 3400 °С, продолжительность безморозного периода – 240 дней. Радиационный баланс – 2603 МДж/м² в год. Осень наступает обычно в конце сентября, в начале её удерживается тёплая ясная погода. Далее число пасмурных дней возрастает, дожди учащаются и становятся более длительными. Зима неустойчивая, с частыми оттепелями, начинается в середине – конце декабря. Весной потепление идёт очень быстро, в конце февраля – начале марта температура воздуха переходит через 5 °С, в начале мая – через 15 °С.

Почва хорошо оструктурена, преобладающая часть агрегатов относится к агрономически ценным фракциям. Сумма водопорочных агрегатов составляет 50...55 %. Плотность гумусового горизонта не превышает 1,4 г/см³, в пахотном – составляет 1,0...1,2 г/см³. Пахотный слой имеет вполне удовлетворительную пористость – 50...60 %. Водный режим почвы непромывной. В отдельные годы после чистого пара наблюдаются глубокие промачивания. Запасы доступной влаги в слое почвы 0...20 см в период посева озимой пшеницы по чистому пару составляют 20...30 мм, снижаясь после непаровых предшественников. Естественная влагозарядка почвы происходит осенью и зимой. Максимум запасов влаги наблюдается ранней весной, составляя в полутораметровом слое обычно не менее 200 мм.

Обеспеченность минеральным азотом и подвижным фосфором – низкая, обменным калием – средняя. Агрохимическая характеристика почвы опытного участка до закладки опыта: гумус – 2,54 %, рН – 7,2, P₂O₅ (по Мачигину) – 13,5...14,0 мг/кг почвы; K₂O (по Мачигину) – 360 мг/кг почвы; нитрификационная способность (по Кравкову) – 15...20 мг/кг почвы.

Участок до закладки опыта находился в длительном использовании под пашню. Севооборот зерно-

паропропашной. Первая ротация: чистый пар; озимая пшеница; озимая пшеница; горох; озимая пшеница; яровой ячмень; кукуруза на силос; озимая пшеница; подсолнечник. Со второй ротации: чистый пар; озимая пшеница; кукуруза на зерно; яровой ячмень; кукуруза на силос; озимая пшеница; горох; озимая пшеница; подсолнечник. Количество полей – 2, повторность 4-х кратная, площадь делянки 135 м², общая площадь опыта 1,94 га.

В среднем за 5 ротаций севооборота продуктивность сельскохозяйственных культур без внесения удобрений составила 2,91 тыс. зерн. ед./га. В среднем за период исследований внесение удобрений повышало величину этого показателя, относительно неудобренного фона, на 29...36 %, а также улучшало качество зерна. Наибольший рост продуктивности севооборота к контролю был равен 10,5 ц/га при максимальной в опыте дозе органоминеральных удобрений (вариант 11).

Содержание органического углерода определяли в пахотном и подпахотном горизонте почвы в 1974, 1983, 1992, 1998, 2001 и 2010 гг. осенью после уборки урожая. Возделывание сельскохозяйственных культур без удобрения в течение 5 ротаций зернопаропропашного полевого севооборота приводило к уменьшению содержания углерода в пахотном и подпахотном слоях чернозема обыкновенного. Перед закладкой опыта содержание углерода в пахотном слое составляло 2,56 %, в подпахотном – 2,3 %. К концу 6 ротации оно снизилось соответственно до 2,27 % и 1,91 %.

Комплексное применение органических и минеральных удобрений в средних и повышенных дозах на протяжении длительного периода стабилизировало содержание углерода в почве в пахотном слое на уровне 2,4...2,54 %, в подпахотном – 2,25...2,36 %. При средних дозах (вариант 8) в пятой ротации наблюдали тенденцию к снижению содержания гумуса в пахотном слое, при этом в подпахотном оно оставалось на прежнем уровне.

В ходе исследования с использованием динамического моделирования была воспроизведена непрерывная динамика органического углерода в пахотном слое почвы в течение пяти ротаций, что открывает возможности для более точной оценки агротехнологического потенциала

управления его запасами путем корректировки условий минерального питания растений в зернопаропропашном севообороте. Моделирование осуществляли на основе данных 1975–2011 гг. по следующим вариантам: абсолютный контроль (контроль), 80 т/га навоза + N3300P190K190 в среднем за севооборот (вариант 8) и 100 т/га навоза + N580P330K330 в среднем за севооборот (вариант 11). Ранее модель использовали для имитационного моделирования динамики органического углерода почвы до 1998 г. по тем же вариантам опыта [17].

Использованная модель круговорота органического углерода в автоморфных почвах RothC-26.3 учитывает влияние типа почвы, температуры, влажности и типа растительного покрова на процесс круговорота углерода. Она работает с месячным шагом, рассчитывая запас общего С (т·га⁻¹), С микробной биомассы (т·га⁻¹) и Δ¹⁴С во временном диапазоне от года до столетий [18, 19, 20]. Модель требует небольшого количества доступных входных данных, представляя собой модификацию более ранней версии [21]. Для запуска модели была обновлена БД стандарта EuroSOMNET – Европейской сети полевых опытов по изучению органического вещества почвы, в который входит длительный полевой опыт [22]. Количество ежемесячно поступающего С в почву рассчитывали с использованием показателей ежегодной урожайности [23] и справочных данных по качеству навоза. Начальное распределение углерода по пулам для запуска модели смоделировано для условий равновесного содержания С. Предварительно вычисляли содержание пула инертного органического углерода по [24]. После этого модель RothC запускали в режиме расчёта распределения С по пулам в начале опыта путём подбора среднепогодной величины поступления С в почву таким образом, чтобы полученный расчётным путем запас органического С соответствовал экспериментально определённому. Настройку модели выполняли по контрольному варианту с использованием остальных вариантов в качестве независимых для проверки качества настройки.

Проверку по экспериментальным данным со статистической оценкой точности проводили на основе Modeval – модели статистической оценки результатов моделирования по RothC [25]. Она представляет собой компьютерную программу, которая рассчитывает ряд показателей для адекватного статистического анализа.

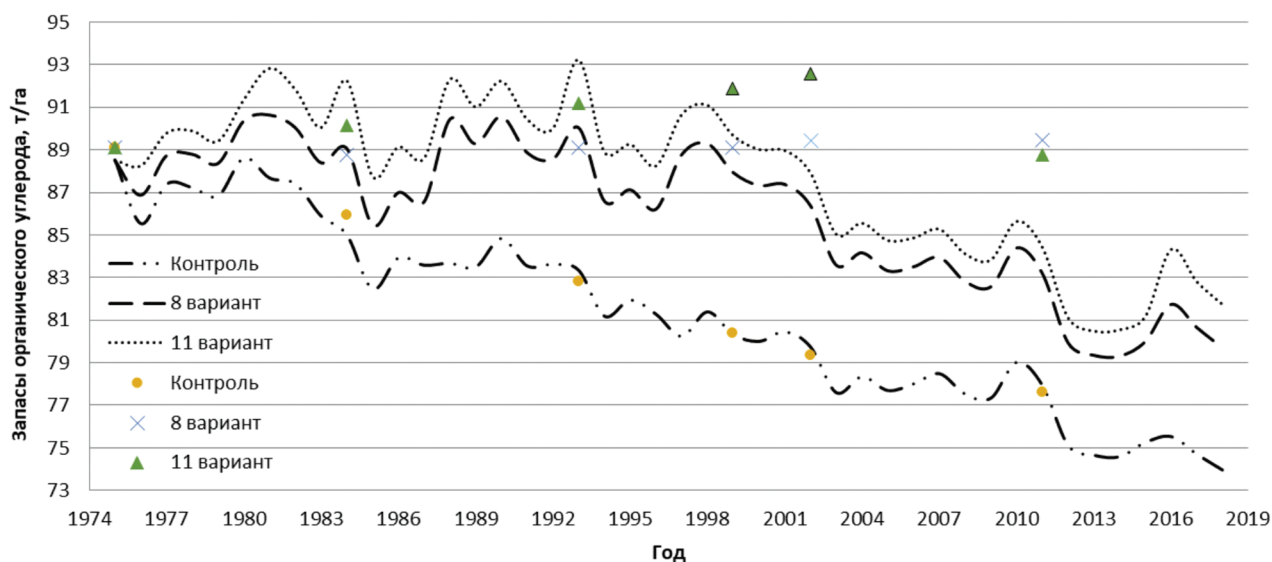


Рис. 1. Динамика запасов (т/га) органического углерода почвы, рассчитанных по модели RothC (линии) и определенных экспериментально (точки) в пахотном слое.

Табл. 1. Статистическая оценка результатов моделирования динамики запасов органического углерода по модели Roth-C в длительном полевом опыте

Вариант	Коэффициент корреляции (r)	Среднеквадратичная ошибка модели (RMSE)	Относительная ошибка (E)	Коэффициент детерминации (CD)	Систематическая ошибка (M)
Контроль	0,99	0,66	0,06	1,23	0,06
8	0,76	3,26	1,81	0,01	1,62
11	0,40	3,32	1,39	0,20	1,26

Результаты и обсуждение. Начальное содержание углерода в слое 0...30 см соответствовало запасу 88,5 т/га. Модель показывает, что в вариантах с органоминеральной системой удобрения в течение первых трёх ротаций абсолютная величина этого показателя возросла до 92...93 т/га. Однако затем накопленный углерод был потерян, что свидетельствует о неравномерности его запасов и значительной зависимости от продуктивности севооборота. В контроле за тот же период при многолетнем отрицательном тренде запасов С было потеряно около 15 т/га от исходной величины. Скорость накопления в благоприятные годы и потери при паровании снижались в следующем ряду: 11 вариант > 8 вариант > контроль (рис. 1).

Статистическая оценка результатов моделирования (табл. 1) указывает на удовлетворительную сходимость экспериментальных данных опыта с расчетными для всех трех исследуемых вариантов, в сравнении с литературными данными оценки точности моделирования RothC по материалам длительных опытов [26].

Лучшая корреляция экспериментальных и расчетных данных наблюдается в контроле, худшая – в 11 варианте. Наименьшее значение корня среднеквадратичной ошибки (RMSE) отмечено в контрольном варианте, но во всех случаях RMSE не превышает 3,4, что свидетельствует о незначительных различиях между прогнозируемыми и фактическими величинами. Коэффициент детерминации в контроле больше 1, что о меньшем отклонении расчетных значений от среднего, чем у экспериментальных данных, то есть модель описывает их лучше, чем график, построенный по средневзвешенным экспериментальным значениям. Значимость систематической ошибки (M) варьирует в диапазоне 0,06...1,62, что свидетельствует о разной степени расхождения между прогнозируемыми и фактическими величинами. Полученные значения систематической ошибки статистически значимы. Необходимо отметить, что ранее, при использовании данных за первые две ротации севооборота, удалось получить более точное соответствие экспериментальных и расчетных данных: величина RMSE не превышала 0,86; M составляла -0,01...-0,02 [17].

Поступление углерода с растительными остатками и навозом в вариантах 8 и 11 в последние 20 лет проведения опыта несколько снижается из-за отсутствия внесения органических удобрений. В контрольном варианте опыта за тот же период запасы органического углерода не претерпевают столь значительного снижения из-за увеличения количества поступающих растительных остатков, по сравнению с предыдущими годами. Отмеченные различия в динамике между контролем и вариантами с внесением удобрений могут быть обусловлены как относительно меньшим количеством растительных остатков, так и меньшим соотношением подземной и надземной продукции в общей биомассе в вариантах 8 и 11, что учитывается в расчетах поступающего в почву углерода с растительными остатками по методике Левина [23].

Наблюдаемые изменения в поступлении органического углерода объясняются регулярным внесением 2 раза за ротацию севооборота органических удобрений. Нулевые значения поступления углерода с растительными остатками и навозом в вариантах 8 и 11 обусловлены тем, что начиная с 2000 г. внесение навоза было прекращено. При этом тенденция увеличения средней величины поступления С в почву при повышении дозы минеральных удобрений сохраняется. Пики с поступлением в почву 8...9 т/га углерода объясняются внесением органических удобрений в почву сразу после уборки урожая кукурузы на силос.

Во всех вариантах опыта модель описывает постепенное снижение запасов органического углерода после прохождения пяти ротаций севооборота (см. рис. 1). При этом видно, что наибольшие расхождения между экспериментальными и моделируемыми данными характерны для вариантов 8 и 11 в 2010 г. Различия в запасах достигали 2,0...2,5 т/га. В то время как модель показывает отрицательный тренд потерь ранее накопленных запасов, выраженный после прохождения второй ротации севооборота, экспериментальные данные демонстрируют относительную стабильность запасов в варианте 8 и потерю около 2 т/га в 2001–2010 гг. в варианте 11. Такое расхождение между наблюдаемыми и рассчитанными по модели данными после третьей ротации может быть связано со значительным пространственным варьированием как содержания органического С в пахотном слое, так и его плотности. Тем не менее, наблюдаемые при анализе модели тенденции указывают на неравномерность накопленных запасов органического С, проявляющуюся даже во время одной ротации севооборота. При этом межгодовая изменчивость за девятилетнюю ротацию могла превышать 4 т/га, или около 5 % от общего запаса С.

Наименьшие потери органического углерода почв, как в абсолютных, так и в относительных величинах по данным модели наблюдаются в 11 варианте опыта с внесением наибольшей дозы органических и минеральных удобрений и достигают максимума в контроле (табл. 2). Как и в длительном опыте ГНУ ВНИИ сахара и сахарной свёклы имени А.Л. Мазлумова [11], по результатам моделирования динамики запасов органического углерода пахотного горизонта почв

Табл. 2. Изменения запасов органического С в длительном полевом опыте с 1975 по 2015 гг., рассчитанные по среднегодовым моделируемым значениям

Показатель	Вариант опыта		
	1 (контроль)	8	11
Абсолютные потери, т/га	13,26	8,50	7,34
Относительные потери, %	14,99	9,60	8,30
Относительные потери в год, %	0,37	0,23	0,20

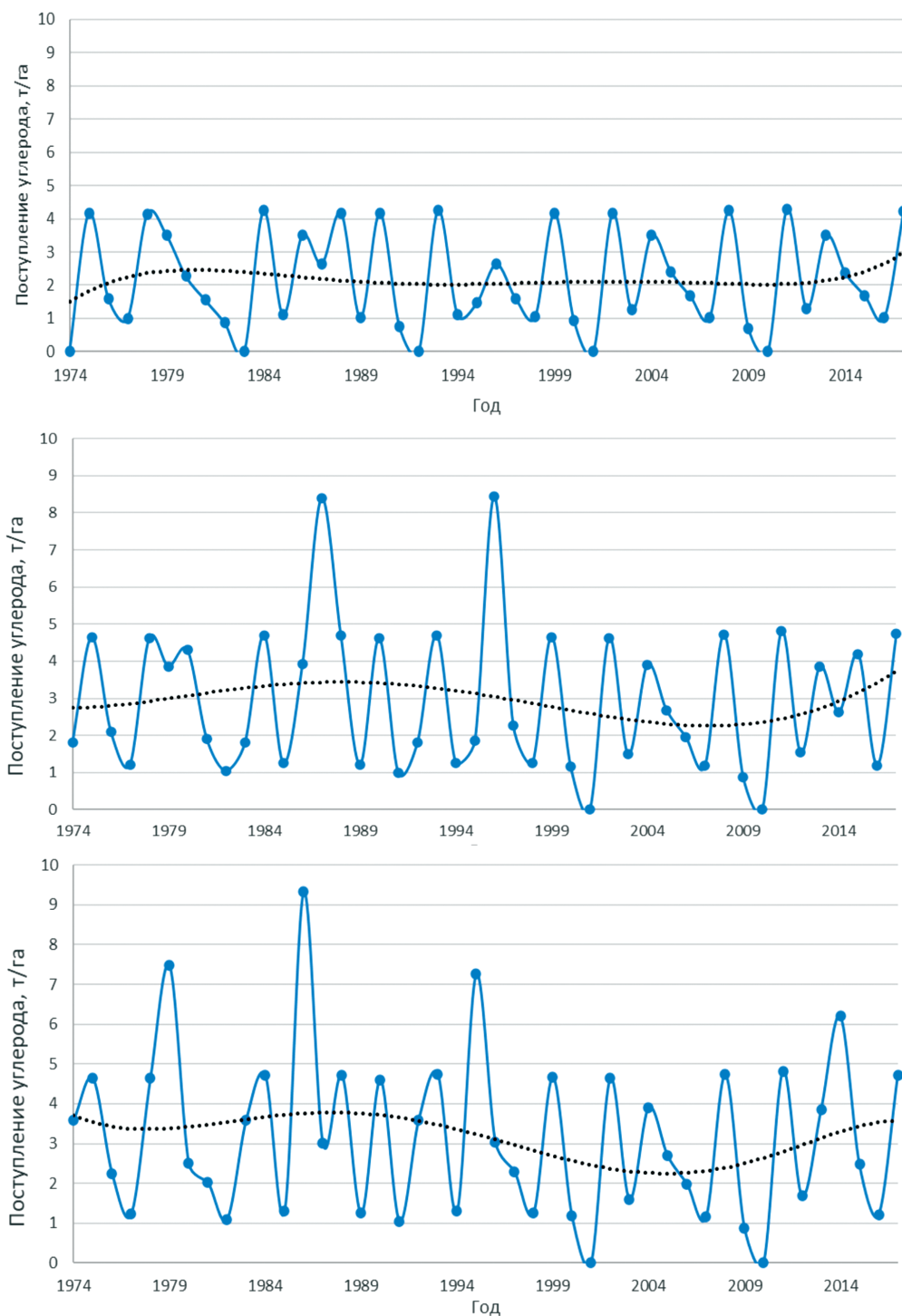


Рис. 2. Поступление углерода с растительными остатками и навозом в 1974–2017 гг.: а) контроль; б) 8 вариант; в) 11 вариант.

отмечена прямая зависимость между дозой внесения органических и минеральных удобрений и потерями органического углерода. Относительные среднегодовые потери его запасов в опыте возрастали с 0,20 % (11 вариант) до 0,37 % (контроль).

Тренд увеличения запасов органического углерода в вариантах с внесением органических и минеральных удобрений наблюдали только в 1975–1993 гг. (см. рис. 1). Анализируя динамику запасов органического С в

этот период (табл. 3), можно наблюдать их ежегодное увеличение в вариантах 8 и 11 соответственно на 0,1 и 0,3 %, что свидетельствует о теоретической возможности достижения цели «Инициативы 4 промилле».

Если рассмотреть скорость накопления либо потери углерода в почве за 1975–2015 гг. (см. табл. 2) и ежегодного поступления С в почву с поверхностными остатками, подземной биомассой и органическими удобрениями (см. рис. 2), оцениваемое моделью среднегодо-

вое количество поступающего в почву С, определяемое линейным уравнением (1), необходимое для поддержания запасов органического углерода в пахотном слое почвы, составит в среднем 3,87 т/га в год:

$$\Delta C = 0,1908 \cdot C_{inp} - 0,7382, \quad (1)$$

где ΔC – среднегодовое изменение запасов С в слое 0...30 см, т/га; C_{inp} – ежегодное суммарное поступление С в почву с пожнивными остатками, подземной биомассой и органическими удобрениями, т/га.

Согласно экспериментальным данным, для поддержания запасов органического углерода необходимо его ежегодное поступление в количестве 2,99 т/га в год.

При наборе культур и агротехнологиях, использованных в период до 1993 г. в варианте 11, согласно линейному уравнению, выведенному по данным моделирования, цель в 4 % в год может быть успешно достигнута при увеличении поступления углерода в почву в среднем до 5,72 т/га. Согласно уравнению, полученному по экспериментальным данным, поступление органического углерода в почву достаточно увеличить до 4,25 т/га.

Табл. 3. Изменения запасов органического С в длительном полевом опыте за 1975–1993 гг., рассчитанные по среднегодовым значениям

Показатель	Вариант опыта		
	1 (контроль)	8	11
Абсолютное изменение, т/га	-3,7	+2,1	+4,7
Относительное изменение, %	-4,2	+2,3	+5,3
Относительное ежегодное изменение, %	-3,3	1	3

Анализируя динамику изменения запасов органического углерода в почвах длительного опыта по двум двадцатилетиям (1975–1995, 1995–2015), можно отметить явное различие в темпах потери или накопления органического углерода в 8 и 11 вариантах, по сравнению с контролем (табл. 4). Наблюдаемое различие связано с заметным снижением доз вносимых органических удобрений в 4 и 5 ротациях севооборота.

Кроме того, в 11 варианте опыта можно выделить небольшой прирост запасов углерода (0,4 % от первоначальных запасов ежегодно) с 1975 по 1995 гг., по сравнению с другими вариантами, в то время как с 1995 по 2015 гг. фиксируются значительные потери. Во втором двадцатилетии для вариантов 8 и 11 ежегодная средняя потеря составляла 4,3 %. В контроле различия между рассматриваемыми 20-летними периодами незначительны и определяются лишь изменением количества и качества поступающих в почву растительных остатков.

Минимальное в опыте накопление органического углерода в первое двадцатилетие происходило при поступлении в почву 3,63 т/га органического углерода, что

Табл. 4. Ежегодный прирост (потери) и поступления С, по вариантам

Период	Вариант опыта		
	1 (контроль)	8	11
1975-1995	-3,72/2,16*	-0,78/2,89	0,4/3,63
1995-2015	-4,08/2,10	-4,09/2,77	-4,53/2,88

*в числителе ежегодный прирост (потери), %; в знаменателе – поступление С, т/га

близко к величинам, полученным по уравнениям зависимости скорости накопления либо потери углерода в почве от поступления С ежегодно в почву с поверхностными остатками, подземной биомассой и органическими удобрениями (3,87 и 2,99 т/га, для смоделированных и экспериментальных данных соответственно).

Таким образом, результаты моделирования подтверждают представления о сложности управления запасами органического углерода и обеспечения его прогрессивного депонирования в почвах, богатых органическим веществом. Ежегодное накопление органического углерода в размере 0,4 % от первоначальных запасов в слое 0...30 см 88 т/га чернозёмом обыкновенным среднемощным мицеллярно-карбонатным тяжелосуглинистым за 40-летний период обеспечивалось в первое двадцатилетие при совместном применении наиболее высоких доз минеральных и органических удобрений. Их внесение поддерживало продуктивность севооборота со средним ежегодным поступлением С с растительными остатками более 3,6 т/га, использование органических и минеральных удобрений позволило за этот период накопить в верхнем слое почвы около 5 т/га С. На фоне наблюдаемой с использованием модели неравновесности накопленных запасов органического С, проявляющейся в межгодовой изменчивости за девятилетнюю ротацию более 4 т/га, или около 5 % от общего запаса С почвы, снижение доз органических удобрений во второе десятилетие и соответствующее уменьшение поступления С на 25 % привело к потере ранее накопленных запасов С. Стратегия «4 промилле» может быть реализована для почвы исследуемого длительного опыта при ежегодном поступлении 4,3...5,7 т/га С растительных остатков. Внесение высоких доз органических удобрений было необходимым компонентом для поддержания и увеличения запасов органического углерода в почвах. В условиях недостатка органических удобрений необходимо дальнейшее имитационное моделирование, чтобы выяснить, могут ли зеленые удобрения, биочар и другие альтернативные источники углерода заменить традиционные органические удобрения на основе навоза.

Литература

1. *The detrital input and removal treatment (DIRT) network: Insights into soil carbon stabilization.* / K. Lajtha, R.D. Bowden, Set Crow, et al. // *Science of The Total Environment.* 2018. Vol. 640. P. 1112–1120, doi:10.1016/j.scitotenv.2018.05.388.
2. *Longterm effects of climate change on carbon storage and tree species composition in a dry deciduous forest* / I. Fekete, K. Lajtha, Z. Kotroczó, et al. // *Global Change Biology.* 2017. Vol. 23. P. 3154–3168. doi:10.1111/gcb.13669.
3. *Soil carbon 4 per mille* / B. Minasny, B.P. Malone, A.B. McBratney, et al. // *Geoderma.* 2017. Vol. 292. P. 59–86, doi:10.1016/j.geoderma.2017.01.002.
4. *A global agenda for collective action on soil carbon.* / S. Vermeulen, D. Bossio, J. Lehmann, et al. // *Nature Sustainability.* 2019. Vol. 2. P. 2–4, doi:10.1038/s41893-018-0212-z.
5. *Arable Podzols Are a Substantial Carbon Sink under Current and Future Climates: Evidence from a Long-Term Experiment in the Vladimir Region, Russia.* / I. Ilichev, V. Romanenkov, S. Lukin, et al. // *Agronomy.* 2021. Vol. 11. No. 1. P. 90.
6. *The effect of crop rotation and cultivation history on predicted carbon sequestration in soils of two experimental fields in the Moscow region, Russia.* / K. Prokopyeva, V. Romanenkov, N. Sidorenkova, et al. // *Agronomy.* 2021. Vol. 11. No. 2. P. 226.

7. Содержание и запас гумуса в черноземе обыкновенном при использовании различных систем основной обработки. / А.М. Медведева, О.А. Бирюкова, Я.И. Ильченко и др. // *Успехи современного естествознания*. 2018. № 1. С. 29–34.
8. Современное состояние гумусированности пахотных черноземов настоящих степей (на примере Ростовской области) / О.В. Чернова, И.О. Алябина, О.С. Безуглова и др. // *Юг России: экология, развитие*. 2021. Т. 15. № 4. С. 99–113.
9. Безуглова О.С., Назаренко О.Г., Ильинская И.Н. Динамика деградации земель в Ростовской области // *Известия Российской академии наук. Серия географическая*. 2022. Т. 86. № 1. С. 41–54.
10. Carbon sequestration in a Brown Chernozem as affected by tillage and rotation / C.A. Campbell, B.G. McConkey, R.P. Zentner, et al. // *Canadian Journal of Soil Science*. 1995. Vol. 75. No. 4. P. 449–458.
11. Mechanisms of carbon sequestration and stabilization by restoration of arable soils after abandonment: A chronosequence study on Phaeozems and Chernozems / I. Kurganova, A. Merino, V.L. de Gerenyu, et al. // *Geoderma*. 2019. Vol. 354. P. 113882.
12. Modelling and Prediction of Organic Carbon Dynamics in Arable Soils Based on a 62-Year Field Experiment in the Voronezh Region, European Russia / I. Husniev, V. Romanenkov, O. Minakova, et al. // *Agronomy*. 2020. Vol. 10. No. 10. P. 1607. doi: 10.3390/agronomy10101607.
13. Dynamics of soil organic carbon in the steppes of Russia and Kazakhstan under past and future climate and land use / S. Rolinski, A.V. Prishchepov, G. Guggenberger, et al. // *Regional Environmental Change*. 2021. Vol. 21. No. 3. P. 73.
14. The WCRP CMIP3 multimodel dataset: A new era in climate change research / G.A. Meehl, C. Covey, T. Delworth, et al. // *Bulletin of the American meteorological society*. 2007. Vol. 88. No. 9. С. 1383–1394.
15. Kurganova I., Lopes de Gerenyu V., Kuzyakov Y. Large-scale carbon sequestration in post-agrogenic ecosystems in Russia and Kazakhstan // *Catena*. 2015. Vol. 133. P. 461–466.
16. Soil Organic Carbon Dynamics in Response to Tillage Practices in the Steppe Zone of Southern Russia / T. Minnikova, G. Mokrikov, K. Kazeev, et al. // *Processes*. 2022. Vol. 10. No. 2. P. 244.
17. Soil organic carbon dynamics in long-term experiments with mineral and organic fertilizers in Russia / V. Romanenkov, M. Belichenko, A. Petrova, et al. // *Geoderma Regional*. 2019. Vol. 17. P. e00221.
18. Jenkinson D. The turnover of organic carbon and nitrogen in soil // *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B: Biological Sciences*. 1990. Vol. 329. No. 1255. P. 361–368.
19. Calculating net primary production and annual input of organic matter to soil from the amount and radiocarbon content of soil organic matter / D.S. Jenkinson, D.D. Harkness, E.D. Vance, et al. // *Soil Biology and Biochemistry*. 1992. Vol. 24. No. 4. P. 295–308.
20. Parshotam A., Hewitt A.E. Application of the Rothamsted carbon turnover model to soils in degraded semi-arid land in New Zealand // *Environment International*. 1995. Vol. 21. No. 5. P. 693–697.
21. Jenkinson D.S., Rayner J.H. The turnover of soil organic matter in some of the Rothamsted classical experiments // *Soil science*. 1977. Vol. 123. No. 5. P. 298–305.
22. EuroSOMNET—a database for long-term experiments on soil organic matter in Europe / U. Franko, G. Schramm, V. Rodionova, et al. // *Computers and Electronics in Agriculture*. 2002. Vol. 33. No. 3. P. 233–239.
23. Левин Ф.И. Количество растительных остатков в посевах полевых культур и его определение по урожаю основной продукции // *Агрехимия*. 1977. № 8. С. 36–42.
24. Falloon P. Estimating the size of the inert organic matter pool from total soil organic carbon content for use in the Rothamsted carbon model // *Soil Biology and Biochemistry*. 1998. Vol. 30. No. 8-9. P. 1207–1211.
25. A comparison of the performance of nine soil organic matter models using datasets from seven long-term experiments / P. Smith, J.U. Smith, D.S. Powlson et al. // *Geoderma*. 1997. Vol. 81. No. 1-2. P. 153–225.
26. Potential for carbon sequestration in European soils: preliminary estimates for five scenarios using results from long-term experiments / P. Smith, D. Powlson, M. Glendinning, et al. // *Global Change Biology*. 1997. Vol. 3. No. 1. P. 67–79.

Поступила в редакцию 22.03.2022
 После доработки 22.04.2022
 Принята к публикации 05.05.2022