

АГРОХИМИЯ
И ПЛОДОРОДИЕ ПОЧВ

УДК 631.417.2631.452631.559631.815.2631.454

ВЛИЯНИЕ СИСТЕМ УДОБРЕНИЯ НА СОДЕРЖАНИЕ ПОЧВЕННОГО
ОРГАНИЧЕСКОГО УГЛЕРОДА И УРОЖАЙНОСТЬ
СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ КУЛЬТУР: РЕЗУЛЬТАТЫ ДЛИТЕЛЬНЫХ
ПОЛЕВЫХ ОПЫТОВ ГЕОГРАФИЧЕСКОЙ СЕТИ РОССИИ

© 2020 г. В. Г. Сычев^а, А. Н. Налиухин^{а, *}, Л. К. Шевцова^а, О. В. Рухович^а, М. В. Беличенко^а

^аВсероссийский научно-исследовательский институт агрохимии имени Д.Н. Прянишникова,
ул. Прянишникова, 31а, Москва, 127434 Россия

*e-mail: naliuhin@yandex.ru

Поступила в редакцию 11.12.2019 г.

После доработки 16.05.2020 г.

Принята к публикации 27.05.2020 г.

Представлены результаты 21-го длительного опыта Географической сети России, проводимого на основных типах почв: дерново-подзолистых (Retisols, Luvisols and Podzols), серых лесных (Luvic Greyzemic Phaeozem), черноземах (Chernozems), каштановых (Kastanozems), лугово-бурых (Albic Stagnic Luvisol) и лугово-черноземовидных (Luvic Greyzemic Stagnic Phaeozem) с широким географическим охватом с севера на юг европейской части России, а также на восток, включая Сибирь, Бурятию и юг Дальнего Востока: Амурскую область, Хабаровский и Приморский края. Стационарные эксперименты имеют продолжительность 20–45 лет, 10 – от 50 до 81 года. Выявлено, что органо-минеральная система удобрения по действию на урожайность превосходила минеральную на 1–40% в 18-ти опытах, а минеральная была на 2–3% эффективнее органо-минеральной системы в трех опытах. Установлено, что в пределах одного типа почв различия в содержании $C_{\text{орг}}$ в удобренных вариантах составляли 0.56–1.55% для дерново-подзолистых почв и 1.58–3.93% для черноземов. Достоверные различия в содержании почвенного органического углерода между вариантами без удобрения и навоз + NPK в четырех опытах были <10 отн. %, в шести – 11–20%, в десяти – более 20% (средняя величина составила 0.27%). Определены уровни минимального и оптимального содержания углерода, которые можно принять как эталонные для каждого типа почв и разновидности по гранулометрическому составу с учетом применяемой системы удобрения.

Ключевые слова: Географическая сеть опытов с удобрениями, эффективность систем удобрений, различные типы почв, минимальное содержание углерода, оптимальное содержание углерода

DOI: 10.31857/S0032180X20120138

ВВЕДЕНИЕ

В мире проводится более 600 длительных полевых опытов с удобрениями, которые охватывают почти все типы почв и климатические условия. Длительные стационарные эксперименты являются уникальной основой для исследований эффективности удобрений, их влияния на почвенное плодородие, урожайность и качество сельскохозяйственных культур [38, 41]. Большое разнообразие почвенных, климатических и погодных условий России, а также огромная изменчивость агрохимических свойств почв в пространстве и времени требуют всесторонних исследований в регионах страны в течение длительного времени. Такие исследования проводятся в рамках Географической сети опытов с удобрениями, головным координатором которых является Всероссийский научно-исследовательский институт агрохимии имени Д.Н. Прянишникова (Геосеть ВНИИА). В состав

Геосети входят 65 научных и учебных учреждений, проводящих около 130 длительных полевых опытов с удобрениями (почти 1/5 от всех опытов в мире). Более половины из них продолжается свыше 35 лет, 15 – более 70 лет. По территории России опыты распределены следующим образом: наибольшее количество сосредоточено в Нечерноземной зоне и Приволжском федеральном округе. В Сибирском федеральном округе – 20 аттестованных длительных опытов, Уральском федеральном округе – семь, на Дальнем Востоке – три опыта [29].

В рамках Геосети решаются вопросы, которые не могут быть изучены в краткосрочных полевых экспериментах:

– возможность устойчивого функционирования агроэкосистем при длительном сельскохозяйственном использовании;

- эффективность систем удобрений (органической, минеральной, органо-минеральной) на различных типах почв в условиях изменяющегося климата и экстремальных погодных условиях;

- поддержание исходного содержания гумуса при применении традиционных систем удобрения;

- изучение длительной временной динамики гумуса и азота в зависимости от применяемых систем земледелия;

- влияние комплексного применения удобрений и пестицидов на вредителей и фитопатогенов сельскохозяйственных культур при изменении климата и введении новых сортов и гибридов;

- изучение взаимодействия между почвой, растениями и удобрениями в процессе возделывания сельскохозяйственных культур;

- проверка моделей эффективности ведения систем земледелия в рамках длительных стационарных исследований.

В последние два десятилетия в длительных полевых опытах в России и в мире дается количественная оценка динамики содержания углерода и азота в почве, разрабатываются методы достижения бездефицитного баланса гумуса. За последние 100 лет среднегодовая температура на Земном шаре увеличилась на 0.74°C , что делает исследования длительных опытов особенно ценными. На основании продолжительного временного тренда можно сделать ретроспективный анализ изменения гумусового состояния почв и разработать мероприятия по недопущению их дегумификации [24, 37, 40, 41].

Цель настоящей работы – изучение изменения почвенного органического углерода ($C_{\text{орг}}$) при применении различных систем удобрения на разных типах почв, а также определение скорости изменения $C_{\text{орг}}$ в контрастных вариантах в длительных опытах Геосети; выявление географических закономерностей эффективности удобрений на основных типах почв России.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Из длительных стационарных опытов, проводимых в рамках Геосети России, включающих органическую, минеральную и органо-минеральную системы удобрений, уравновешенных по действующему веществу, выбрали 21 опыт. В качестве контроля использовали вариант без внесения удобрений.

Опыты заложены на основных типах почв: дерново-подзолистых (Retisols, Luvisols and Podzols), серых лесных (Luvic Greyzemic Phaeozem), черноземах (Chernozems), каштановых (Kastanozems), лугово-бурых (Albic Stagnic Luvisol) и лугово-черноземовидных (Luvic Greyzemic Stagnic Phaeozem) (табл. 1).

Мы представляем результаты длительных полевых опытов с широким географическим охватом: с севера (Тверская область) на юг (Краснодарский край), на восток, включая Сибирь, Бурятию и юг Дальнего Востока: Амурскую область, Хабаровский и Приморский края.

Большинство (11 опытов) заложены в период 1964–1993 гг., 10 опытов имеют продолжительность от 50 до 81 года. Все эксперименты, за исключением Москвы (Долгопрудная агрохимическая опытная станция), являются действующими. Результаты исследований приводятся по материалам, полученным в первые два десятилетия XXI в.

Длительные стационарные опыты заложены на трех последовательно вводимых полях, что позволяло оценить воздействие удобрений на урожайность каждой культуры за три года в одной ротации севооборота. В ряде опытов исследования ведутся на одном севооборотном поле. Некоторые эксперименты развернуты в пространстве и во времени на всех полях севооборота.

Среднегодовая температура колебалась от 0.8°C (Амурская область, Благовещенск) до 10.9°C (Краснодарский край) при годовом количестве осадков от 242.3 (республика Бурятия) до 696 мм (Смоленская область). Следовательно, амплитуда колебаний температуры составляла 13.6 раз, осадков – 2.9 раза. Подробная характеристика опытов представлена в табл. 1, 2.

С каждой делянки с помощью тростьевого бура из пахотного слоя почвы (0–20 см) отбирали 15–20 индивидуальных образцов, проходя посередине, вдоль длинной стороны делянки, для составления смешанного образца. Повторность – трех-четырёхкратная. Отбор образцов проводили осенью, после завершения ротации севооборота. Во всех исследованиях содержание $C_{\text{орг}}$ в почве определяли окислением органического вещества бихроматным методом И.В. Тюрина. Различия в изменении содержания $C_{\text{орг}}$ в почве длительных опытов статистически обрабатывали (Multifactor analysis of variance ANOVA) с последующей оценкой достоверности между вариантами при $p < 0.05$.

Ссылки на оригинальные статьи руководителей и соисполнителей стационарных полевых опытов с удобрениями Геосети ВНИИА приводятся в табл. 1.

Урожайность культур севооборотов для унификации обобщения материалов приведена в центнерах зерновых единиц (з. е.) на 1 га.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Урожайность. За последние 30 лет урожайность сельскохозяйственных культур, как в полевых опытах, так и на землях сельхозпредприятий увеличилась в два раза. Во многом это связано с

Таблица 1. Краткая характеристика длительных опытов

Учреждение Геосети, место проведения опыта	Год закладки	Почва	Гранулометрический состав	Среднегодовая температура, °С	Годовое количество осадков, мм (среднее)
ЦОС ВНИИА, Московская область [1]	1960	Дерново-среднеподзолистая на тяжелом покровном суглинке, Albic Glossic Retisol (Loamic, Agic, Cutanic, Differentic, Ochric)	Тяжелосуглинистый	3.8	575
ВНИИ льна, Торжок, Тверская область [13]	1948	Дерново-среднеподзолистая супесчаная на карбонатном моренном суглинке, Albic Luvisol (Eriapenic, Endoloamic, Agic, Cutanic, Ochric, Raptic)	Супесчаный	3.8	613
ДАОС, Москва [16]	1931	Дерново-среднеподзолистая на тяжелом покровном суглинке, Albic Glossic Retisol (Loamic, Agic, Cutanic, Differentic, Ochric)	Тяжелосуглинистый	4.5	578
Курганский НИИСХ [8]	1970	Чернозем выщелоченный, Luvis Chernozem (Loamic, Agic, Tongic)	Тяжелосуглинистый	3.0	477
Пермский НИИСХ [12]	1968	Дерново-мелкоподзолистая на покровном суглинке, Glossic Retisol (Loamic, Agic, Cutanic, Ochric)	Тяжелосуглинистый	1.5	609
ВНИИ кормов [14]	1947	Дерново-среднеподзолистая, Albic Glossic Retisol (Loamic, Agic, Cutanic, Differentic, Ochric)	Среднесуглинистый	3.2	600
ВНИИ сахарной свеклы и сахара им. А.Л. Мазулова, Воронежская область [21, 22]	1936	Чернозем выщелоченный малогумусный среднемощный на тяжелом карбонатном суглинке, Luvis Chernozem (Loamic, Agic, Raptic)	Тяжелосуглинистый	5.6	501
Владимирский НИИСХ, Владимирская область [23]	1993	Серая лесная обычная на лёссовидном карбонатном суглинке, Luvis Greyzem Phaeozem (Loamic, Agic)	Среднесуглинистый	3.4	604
ВНИИОУ, Владимирская область [17]	1968	Дерново-сильноподзолистая, слабogleвая, подстилая моренным суглинком, Albic Endostagnic Luvisol (Eriapenic, Endoloamic, Agic, Cutanic, Ochric, Raptic)	Супесчаный	4.2	627
Белгородский НИИСХ [32]	1987	Чернозем типичный среднемощный малогумусный на лёссовидном суглинке, Napric Chernozem (Loamic, Agic, Raptic)	Среднесуглинистый	6.3	529
Бурятский НИИСХ, Улан-Удэ, республика Бурятия [5, 33]	1967	Каштановая мучнисто-карбонатная, типичная на пролювиально-делювиальных супесчаных отложениях, Napric Kastanozem (Loamic, Agic)	Легкосуглинистый	2.0	242
Сибирский НИИСХ, Омск [9]	1987	Чернозем выщелоченный среднемощный среднегумусный на аллювиальных средних суглинках, Luvis Chernozem (Loamic, Agic, Raptic)	Тяжелосуглинистый	1.0	363

Таблица 1. Окончание

Учреждение Геосети, место проведения опыта	Год закладки	Почва	Гранулометрический состав	Среднегодовая температура, °С	Годовое количество осадков, мм (среднее)
Институт сельского хозяйства КБНЦ РАН, г. Нальчик [4, 16]	1948	Чернозем обыкновенный карбонатный на мицелярно-карбонатном лёссовидном суглинке, <i>Haplic Chernozem (Loamic, Aric)</i>	Тяжелосуглинистый	10.1	451
Дальневосточный НИИСХ, юг Дальнего Востока, Хабаровский р-н, Хабаровский край [25]	1965	Лугово-бурая оподзоленная, <i>Albic Stagnic Luvisol (EpiLoamic, Katoclayic, Aric, Cutanic, Ochric)</i>	Тяжелосуглинистый	2.4	704
Всероссийский НИИ сои, юг Дальнего Востока, Амурская область [27]	1964	Лугово-черноземовидная среднемошная тяжелосуглинистая на покровных глинах, <i>Luvic Greyzemic Stagnic Phaeozem (Loamic, Aric, Pachic)</i>	Тяжелосуглинистый	0.8	480
Приморский НИИСХ, юг Дальнего Востока, Приморского края [31]	1941	Лугово-бурая отбеленная на озерно-аллювиальных отложениях, <i>Albic Stagnic Luvisol (EpiLoamic, Katoclayic, Aric, Cutanic, Ochric)</i>	Тяжелосуглинистый	3.0	626
Новозыбковская государственная сельскохозяйственная опытная станция ВНИИ люпина [2]	1993	Дерново-подзолистая песчаная, на древнеаллювиальной супеси, подстилаемой связным песком (флювиогляциальные отложения), <i>Albic Podzol (Arenic, Aric)</i>	Песчаный	6.2	582
Ижевская ГСХА, г. Ижевск, Удмуртской Республики [6]	1979	Дерново-среднеподзолистая на красно-буром опесчанном суглинке, <i>Albic Retisol (Loamic, Aric, Cutanic, Differentic, Ochric)</i>	Среднесуглинистый	2.1	500
Смоленский НИИСХ, Смоленская область [19]	1978	Дерново-подзолистая на морене, <i>Albic Glossic Retisol (Loamic, Aric, Cutanic, Differentic, Ochric)</i>	Легкосуглинистый	5.3	696
ВНИИ агрохимии им. Д.Н. Прянишникова, стационар Шебанцево [18]	1964	Дерново-среднеподзолистая на тяжелом покровном суглинке, <i>Albic Glossic Retisol (Loamic, Aric, Cutanic, Differentic, Ochric)</i>	Тяжелосуглинистый	3.8	575
Северо-Кубанская СХОС [28]	1978	Чернозем обыкновенный на лессовидном суглинке, <i>Haplic Chernozem (Loamic, Aric, Pachic)</i>	Тяжелосуглинистый	10.9	569

Примечание: НИИСХ – Научно-исследовательский институт сельского хозяйства; НИИ – научно-исследовательский институт; ВНИИ – Всероссийский научно-исследовательский институт; ГСХА – Государственная сельскохозяйственная академия; СХОС – сельскохозяйственная опытная станция; ЦОС ВНИИА – Центральная опытная станция Всероссийского научно-исследовательского института агрохимии имени Д.Н. Прянишникова; ДАОС – Долгопрудная агрохимическая опытная станция; КБНЦ РАН – Кабардино-Балкарский научный центр Российской академии наук.

Таблица 2. Влияние различных систем удобрения на содержание $C_{орг}$ в длительных стационарных опытах Геосети России

Место проведения опыта, учреждение Геосети	Год закладки	Период отбора образцов	Срок экспери- мента, лет	Содержание $C_{орг}$, % от сухой почвы					ежегодное ΔC
				контроль (без удобрений)	НРК	навоз	навоз + НРК	ΔC (max -min)	
Дерново-подзолистые почвы (Retisols, Luvisols and Podzols)									
Владимирская область	1968	2002	34	0.56	0.59	0.69	0.73	0.17*	0.0051
Брянская область	1993	2012	20	0.97	1.15	1.24	1.22	0.26*	0.0131
Тверская область	1948	2011	63	0.58	0.61	0.73	0.74	0.16*	0.0025
Смоленская область	1978	2015	37	1.00	1.20	1.00	1.20	0.20*	0.0054
Удмуртская республика	1979	2006	27	0.86	0.90	0.91	0.99	0.13*	0.0047
Московская область, ВНИИК	1947	2012	66	1.55	1.68	1.94	—	0.39*	0.0059
Москва, ДАОС	1931	2007	76	0.70	0.96	1.14	—	0.44*	0.0057
Пермский край	1968	2009	41	1.23	1.29	1.29	1.43	0.20*	0.0048
Московская область, ВНИИА	1960	2011	51	0.96	1.00	—	1.09	0.13*	0.0025
Московская область, СШ-5	1964	1992	28	0.75	0.75	0.87	0.93	0.17*	0.0063
В среднем								0.23	0.0056
Серые лесные почвы (Luvic Greyzemis Phaeozem)									
Владимирская область	1993	2014	21	1.68	1.83	1.89	2.06	0.38*	0.0182
Черноземы выщелоченные, обыкновенные, типичные (Chernozems)									
Курганская область	1970	2007	37	3.11	3.03	3.07	3.11	0.00	0.0000
Омск	1987	2008	21	3.93	4.05	4.04	4.16	0.24*	0.0113
Нальчик на богаре при орошении	1948	2015	67	1.61	1.82	—	2.14	0.53*	0.0079
Воронежская область	1936	2017	81	1.58	1.76	—	1.90	0.32*	0.0048
Краснодарский край	1978	2005	27	2.84	3.25	—	3.32	0.48*	0.0059
Белгородская область	1987	2015	28	2.20	2.34	—	2.35	0.15*	0.0054
Среднее				2.90	2.92	3.11	3.13	0.22*	0.0079
Каштановые почвы (Kastanozems)									
Бурятский, Улан-Удэ	1967	2017	50	0.50	0.61	0.82	0.70	0.20*	0.0039
Лугово-бурые почвы (Albic Stagnic Luvisol)									
Хабаровский край без известкования с известкованием	1965	2015	50	1.97	2.26	2.38	2.38	0.40*	0.0081
Приморский край	1941	2014	73	2.09	2.32	2.55	2.44	0.46*	0.0093
В среднем				1.72	1.88	—	1.99	0.27*	0.0037
Лугово-черноземовидные почвы (Luvic Greyzemis Stagnic Phaeozem)									
Амурская область	1964	2013	45	2.32	2.20	—	2.44	0.12*	0.0026
Среднее по опытам (средняя продолжительность опытов 36 лет, от 20 до 81 года)								0.27	0.0067

* Достоверные изменения содержания и запасов $C_{орг}$ при $p < 0.05$ указаны по данным работ авторов, приведенных в табл. 1.

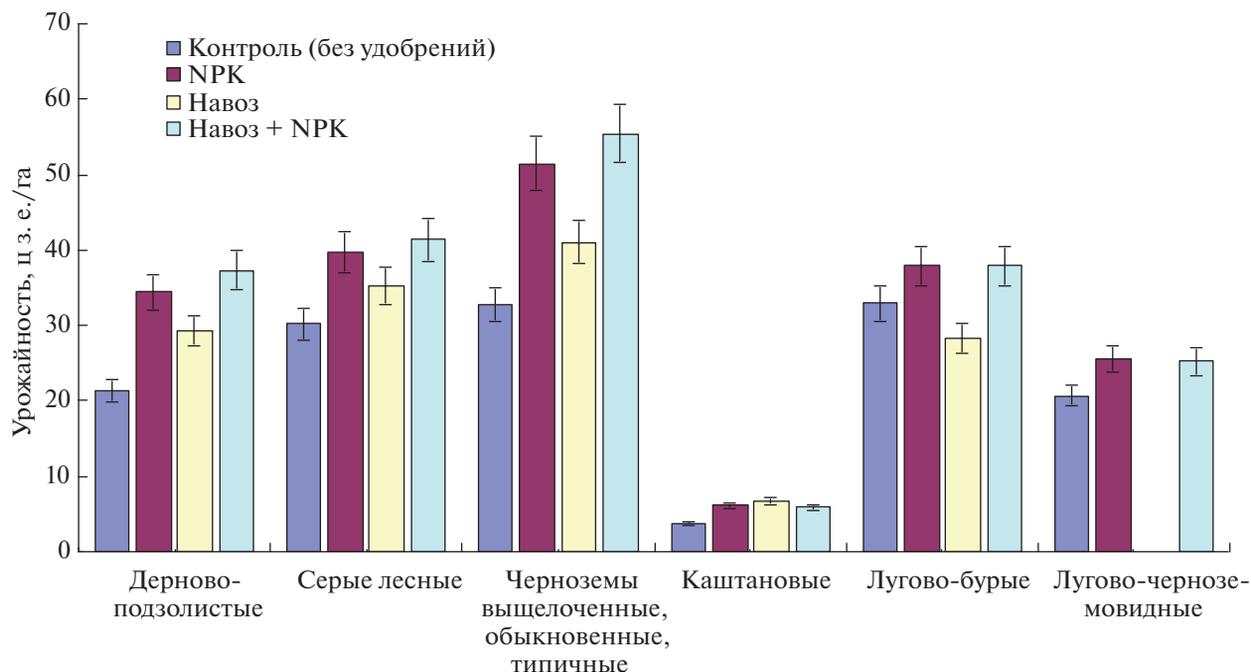


Рис. 1. Эффективность минеральной, органической и органо-минеральной систем удобрения на разных типах почв в длительных опытах Геосети России (обобщенные данные по 21 опыту).

применением средств защиты растений (фунгициды, инсектициды, гербициды и др.), регуляторов роста растений, а также с успехами селекционеров в создании высокоинтенсивных сортов, отзывчивых на применение удобрений. Многие длительные опыты демонстрируют положительную динамику продуктивности севооборотов, окупаемости удобрений урожайностью культур и улучшение основных показателей плодородия почв.

Например, в 51-летнем опыте Центральной опытной станции ВНИИ агрохимии на дерново-подзолистой тяжелосуглинистой почве без применения химических средств защиты растений продуктивность севооборота без удобрений составляла всего 30.4, а при органо-минеральной системе удобрения – 39.7 ц з. е./га. Дополнительное использование гербицидов, фунгицидов и ретардантов повысило продуктивность севооборота на 13.1 ц з. е./га [1]. В Кабардино-Балкарском научном центре РАН на черноземе обыкновенном карбонатном тяжелосуглинистом без внесения удобрений на богаре продуктивность севооборота составила 19.2 ц з. е./га. На фоне орошения совместное внесение навоза с $N_{44}P_{42}K_{24}$ способствовало последовательному увеличению продуктивности севооборота в 2.6 раза до 49.9 ц з. е./га в 2010–2016 гг. [3, 4]. Аналогичные результаты получены и на других стационарных опытах.

Анализируя влияние удобрений на урожайность культур и продуктивность севооборотов в длительных стационарных опытах, можно выделить следующие зональные особенности.

По мере продвижения с севера на юг европейской части России увеличивается теплообеспеченность, что наряду с ростом гумусированности почв ведет к повышению урожайности сельскохозяйственных культур. Если на дерново-подзолистых почвах среднегодовая продуктивность севооборотов в неудобранных вариантах составляла 21.3 ц з. е./га, на серых лесных – 30.2, то на черноземах – 32.7 ц з. е./га (рис. 1).

Во всех опытах минеральная система удобрения имела преимущество над органической. Наибольший эффект от NPK по сравнению с внесением навоза (+25%) отмечен в опытах, проведенных на почвах с большим содержанием почвенного органического углерода (черноземах), наименьший – на дерново-подзолистых и серых лесных (12–17%).

Органо-минеральная система обеспечивала наибольшую продуктивность севооборотов: 55.4 ц з. е./га на черноземах выщелоченных, обыкновенных, южных, 41.4 – на серых лесных и 37.3 ц з. е./га на дерново-подзолистых почвах. При совместном внесении навоза и NPK урожайность по сравнению с контролем возрастала в среднем в 1.4–1.8 раза. Наибольшая разница по сравнению с неудобранным вариантом отмечена в опытах ВНИИ льна на дерново-подзолистой легкосуглинистой почве – 215% от контроля [13]. В опыте на сеяном пастбище ВНИИ кормов за 39 лет наблюдений органо-минеральная система удобрения давала прибавку урожайности луговых трав более чем в 3 раза и превосходила по продуктивности органическую в 1.7 раза [14].

Такой же высокий уровень урожайности при совместном внесении органических и минеральных удобрений (307% от контроля) отмечался в длительном стационарном опыте ВНИИ сахарной свеклы и сахара на черноземе выщелоченном тяжелосуглинистом [21, 22]. В засушливых условиях Кабардино-Балкарии орошение способствовало повышению эффективности удобрений на 70% [3, 4].

В условиях сухой засушливой степи Забайкальского края в длительном стационарном опыте Бурятского НИИСХ, заложенном в 1967 г. на каштановой мучнисто-карбонатной среднетяжелой супесчаной почве, при систематической засухе урожайность пшеницы и овса была низкой (4.6–5.4 ц/га), овса на зеленую массу – 8.6 ц/га [7, 33]. В условиях засухи 2015–2017 гг., когда с мая по июль выпадало всего около 60 мм осадков, внесение навоза в дозе 20 т/га в чистом пару превосходило внесение эквивалентных доз минеральных удобрений на 11%, а органо-минеральных систем – на 15%.

На юге Дальнего Востока на лугово-черноземовидных и лугово-бурых почвах, составляющих основной массив пашни Дальневосточного региона, заложено три опыта, продолжительностью более 50 лет: в Амурской области, Хабаровском и Приморском краях. В опытах Всероссийского НИИ сои, Дальневосточного НИИСХ и Приморского НИИСХ в севооборотах с ведущей для данного региона культурой – соей – органо-минеральная система удобрения по продуктивности севооборота была равна минеральной. Следует отметить, что на лугово-бурых почвах Хабаровского края органическая система уступала как минеральной, так и органо-минеральной на 25%. Для Приморского и Хабаровского краев, характерен муссонный климат, с выпадением большого количества осадков за вегетационный период (527–556 мм). В Амурской области выпадает несколько меньшее, но достаточное количество осадков (390 мм за вегетацию). Продуктивность севооборотов с соей на лугово-черноземовидных почвах была на 34% меньше, чем лугово-бурых и составляла 20.7 в контроле и 25.2–25.6 ц з. е./га при минеральной и органо-минеральной системах удобрения [10, 25, 27, 31].

Следует отметить, что органо-минеральная система удобрения по действию на урожайность превосходила минеральную на 1–40% в 17 опытах, в то время как минеральная была эффективнее органо-минеральной на 2–3% в трех опытах и на 40% – в одном (возможно, это недостоверно) (рис. 2).

Можно выявить следующую закономерность в эффективности удобрений в различных почвенно-климатических зонах страны. В европейской части России продуктивность севооборотов увеличивается с севера на юг в ряду почв: дерново-

подзолистые < серые лесные < черноземы (выщелоченные, обыкновенные, южные). В этой зоне выделяется органо-минеральная система удобрений. В условиях сухой степи Забайкалья при остром дефиците влаги урожайность резко уменьшается, а наибольшая величина отмечается при раздельном внесении органических и минеральных удобрений. На юге Дальнего Востока более продуктивными являются лугово-бурые почвы по сравнению с лугово-черноземовидными. В условиях муссонного климата эффективность органо-минеральных систем удобрения равна минеральной.

Содержание почвенного органического углерода ($C_{орг}$), его динамика и баланс в длительных опытах Геосети. Из-за большой вариабельности содержания $C_{орг}$ в пространстве и времени существенные изменения гумусового состояния почв могут быть подтверждены только при систематическом анализе почвы в одних и тех же вариантах в течение длительного периода времени. Также представляется сомнительным сравнение содержания $C_{орг}$ за короткий промежуток времени (3–5 лет). Необходимо изучать содержание $C_{орг}$ в динамике, чтобы уловить направленность и темпы изменения почвенного органического вещества при изменении агротехники, способов обработки почв, сроков, способов и доз внесения удобрений. Именно поэтому проведение исследований в длительных опытах Геосети по единой методике служит объективной причиной для получения достоверных результатов по содержанию, динамике и балансу почвенного органического углерода.

На основе анализа данных, полученных в 21-м длительном полевом опыте Геосети ВНИИА, изучено влияние различных систем удобрения на содержание $C_{орг}$ в почве (табл. 2). Результаты свидетельствуют о большом различии в содержании $C_{орг}$ между опытами, которое изменялось в не-удобренных вариантах в диапазоне 0.50–3.93%. В пределах одного типа почв различия были значительно меньше и составляли 0.56–1.55% для дерново-подзолистых и 1.58–3.93 для черноземов. В 18 опытах наибольшая разница между минимальным и максимальным содержанием $C_{орг}$ наблюдалась между контролем и органо-минеральной системой удобрения, в трех опытах – между контролем и органической системой. Достоверные различия в содержании почвенного органического углерода между вариантами без удобрения и навоз + НРК в четырех опытах были <10 отн. %, в шести различия составляли 15–20%, в десяти – более 20% (рис. 3). В среднем по 21 эксперименту, дифференциация между минимальным и максимальным содержанием $C_{орг}$ на период отбора образцов составила 21 отн. % или 0.27 абс. %. Наименьшая вариация отмечена для

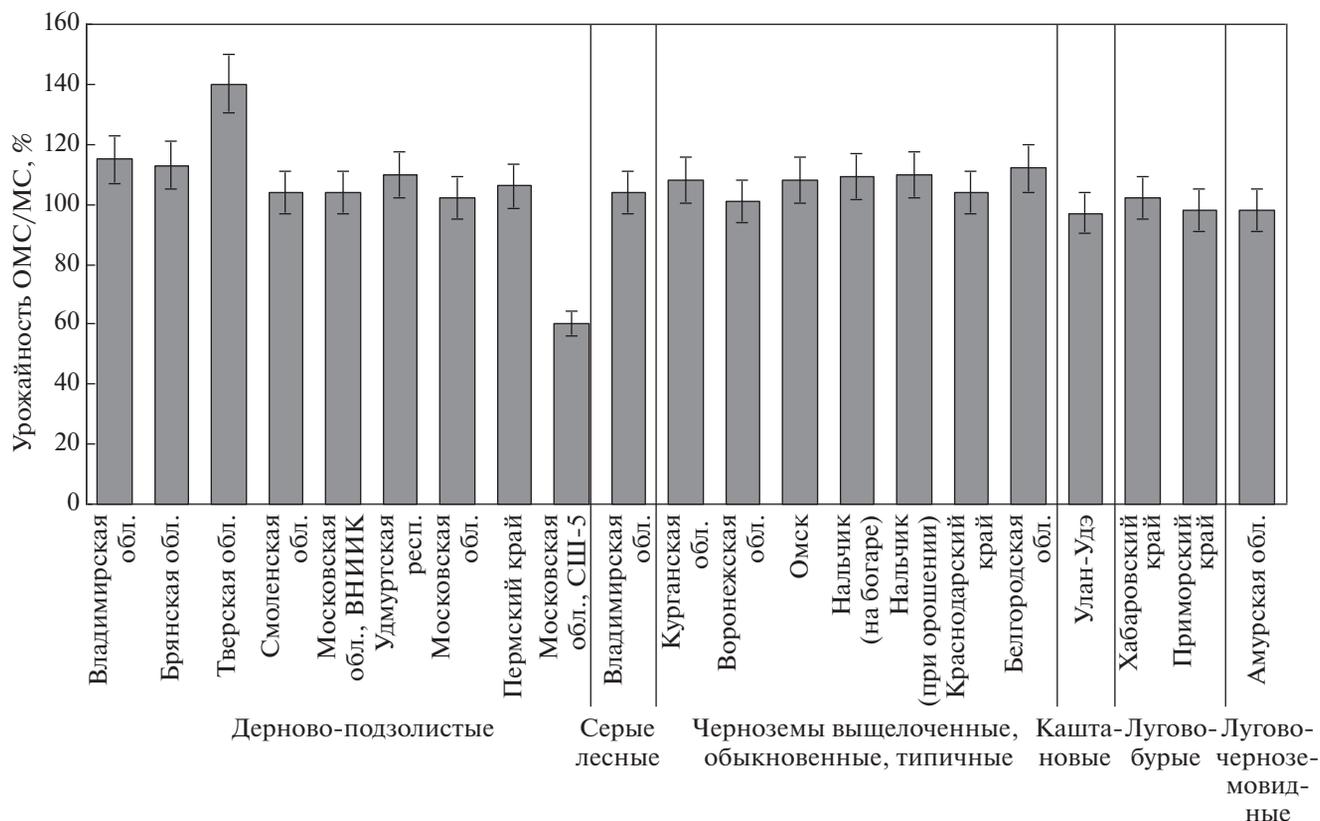


Рис. 2. Изменение урожайности в севооборотах при органо-минеральной системе удобрения (ОМС) на разных типах почв в сравнении с минеральной (NPK) системой (МС) (урожайность при применении МС взята за 100%, обобщенные данные по 21 опыту).

черноземов выщелоченных и лугово-черноземовидных почв.

Изменение $C_{орг}$ в различных типах почв является важнейшим информативным показателем скорости прироста/убыли гумуса [20]. Несмотря на различия в генезисе почв, природно-климатических условиях, агротехнике и других факторах среднегодовые темпы прироста запасов $C_{орг}$ между “контрастными” вариантами имели общие закономерности. В дерново-подзолистых, черноземах, лугово-бурых почвах темпы изменения запасов почвенного органического вещества в пахотном слое (0–20 см) составляли 0.14–0.16 т/год.

В каштановых и лугово-черноземовидных почвах изменение запасов $C_{орг}$ было в 2 раза меньше. При этом в серых лесных почвах скорость прироста была наибольшей и составляла 0.49 т $C_{орг}$ /год. Возможно, это связано с тем, что все системы удобрения изучаются на известкованном фоне.

Следует отметить, что, несмотря на повышение содержания органического вещества в почвах при применении органических удобрений и при их совместном внесении с минеральными, во многих экспериментах не удается сохранить исходное (до закладки) содержание $C_{орг}$ (табл. 3,

рис. 4, 5). Анализ экспериментальных данных позволил выявить три разнонаправленные тенденции изменения $C_{орг}$ по сравнению с исходным уровнем (перед закладкой опытов):

- уменьшение содержания $C_{орг}$,
- сохранение содержания $C_{орг}$,
- увеличение содержания $C_{орг}$ по сравнению с первоначальным значением.

Например, в опыте ВНИИ льна, на дерново-подзолистой легкосуглинистой почве, за 63-летний период наблюдений отмечается продолжающееся уменьшение содержания $C_{орг}$ во всех вариантах опыта по сравнению с исходным, перед закладкой эксперимента. Особенно заметна (–0.55% или 14.85 т/га в пахотном слое 0–20 см, при $p < 0.05$) убыль $C_{орг}$ на контроле без внесения удобрений. Несмотря на дозы органических удобрений, рассчитанные на поддержание исходного уровня содержания почвенного органического вещества, его величина не стабилизировалась до настоящего времени. Особенно сильное уменьшение содержания и запасов гумуса, по данным [13], произошло в третьей ротации льняного севооборота, когда было проведено углубление пахотного слоя с припахиванием

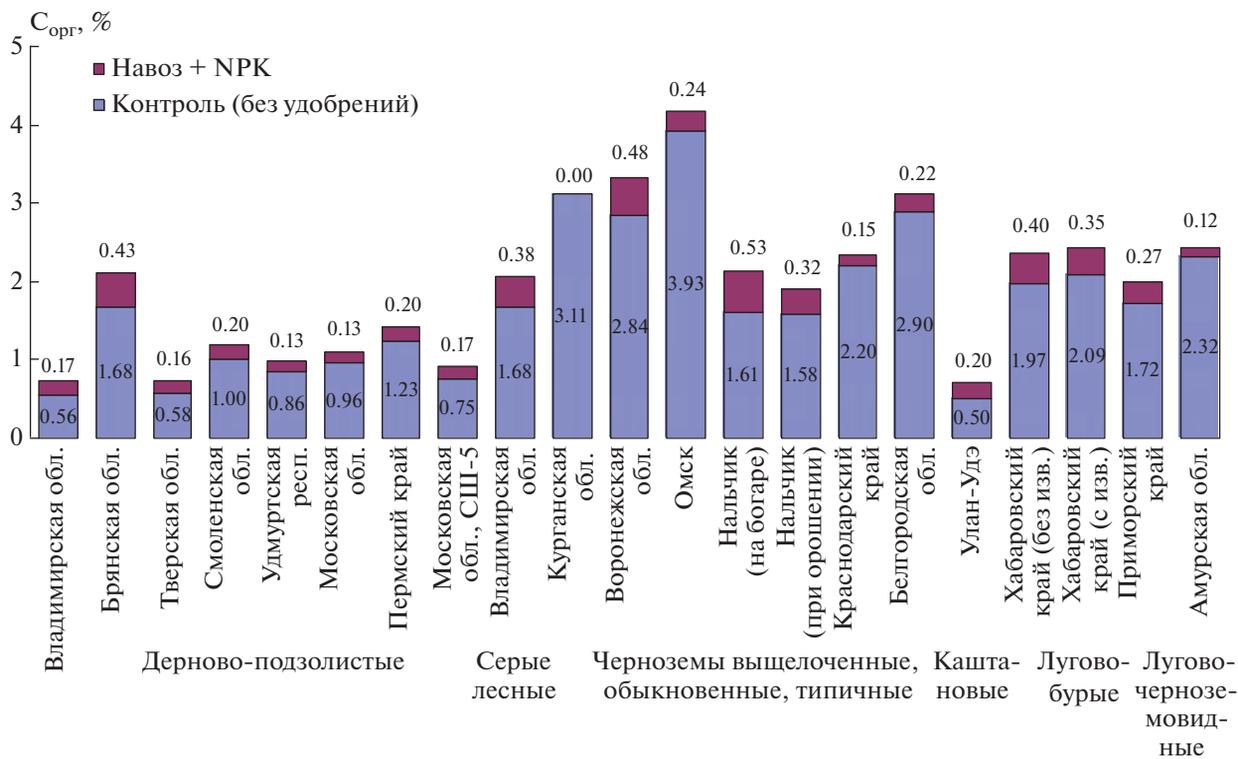


Рис. 3. Накопление $C_{орг}$ в почвах длительных опытах Геосети при органо-минеральной системе удобрения по сравнению с контролем. Розовым цветом показан прирост почвенного органического вещества в варианте с органо-минеральной системой, % от неудобрённого варианта (контролю).

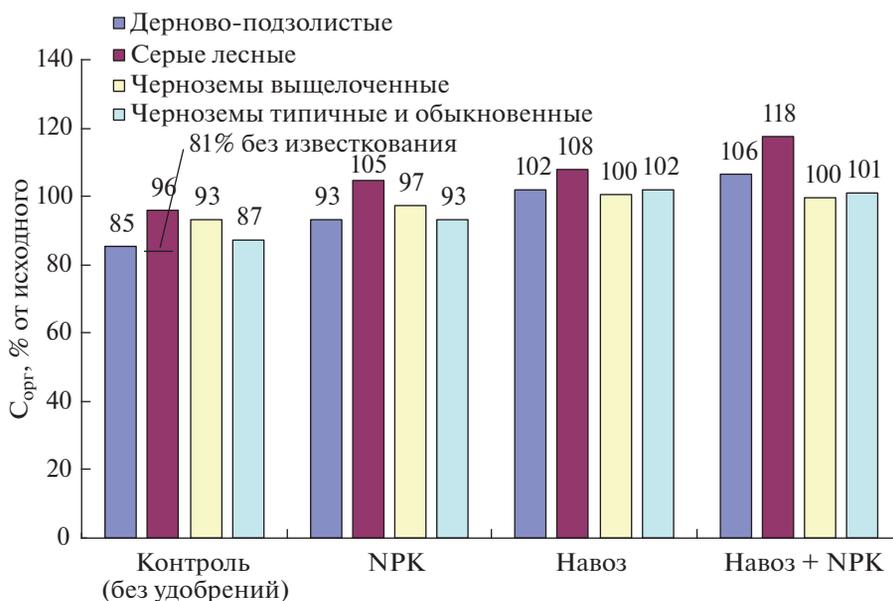


Рис. 4. Изменение относительного содержания $C_{орг}$ на дерново-подзолистых, серых лесных почвах и черноземах (выщелоченных, типичных и обыкновенных) по сравнению с исходным уровнем (до закладки опытов, обобщенные данные).

Таблица 3. Изменение $S_{орг}$ в длительных стационарных опытах Геосети России (21 опыт) по сравнению с исходным уровнем

Место проведения опыта, учреждение Геосети	Год закладки	Изменение содержания $S_{орг}$, абс. % от исходного				Изменение запасов $S_{орг}$ в пахотном слое (0–20 см) от исходного уровня, т/га			
		контроль (без удобрений)	NPК	навоз	навоз + NPК	контроль (без удобрений)	NPК	навоз	навоз + NPК
Дерново-подзолистые почвы (Retisols, Luvisols and Podzols)									
Владимирская область	1968	-0.07	-0.04	0.06	0.11	-1.89	-1.08	1.62*	2.97*
Брянская область	1993	-0.13	-0.13	0.02	0.03	-3.51*	-3.51*	0.54	0.81
Тверская область	1948	-0.55	-0.36	-0.38	-0.33	-14.85*	-9.72*	-10.26*	-8.91*
Смоленская область	1978	-0.40	-0.30	-0.20	-0.10	-10.80*	-8.10*	-5.40*	-2.70*
Удмуртская республика	1979	-0.39	-0.35	-0.34	-0.26	-10.53*	-9.45*	-9.18*	-7.02*
Московская область, ВНИИК	1947	0.38	0.50	0.76	—	10.26*	13.50*	20.52*	—
Москва, ДАОС	1931	-0.36	-0.10	0.08	—	-9.72*	-2.70*	2.16*	—
Пермский край	1968	-0.04	0.02	0.02	0.16	-1.08*	0.54	0.54	4.32*
Московская область, ВНИИА	1960	0.05	0.09	—	0.17	1.35	2.43*	—	4.59*
Московская область, СШ-5	1964	-0.30	-0.40	0.00	0.00	-8.10	-10.80*	0.00	0.00
Серые лесные почвы (Luvic Greyzemis Phaeozem)									
Владимирская область	1993	-0.07	0.08	0.14	0.31	-1.89*	2.16*	3.78*	8.37*
Черноземы выщелоченные, обыкновенные, типичные (Chernozems)									
Курганская область	1970	0.00	-0.09	-0.05	0.00	0.00	-1.80	-1.00	0.00
Омск	1987	-0.02	0.10	0.09	0.21	-0.40	2.00	1.80	4.20*
Нальчик	1948	-0.45	-0.24	—	0.08	-9.00*	-4.80*	—	1.60*
на богаре при орошении	1936	-0.48	-0.30	—	-0.16	-9.60*	-6.00*	—	-3.20*
Воронежская область	1978	-0.7	0.29	—	0.23	-14.00*	5.80*	—	4.60*
Краснодарский край	1978	-0.03	0.08	—	0.09	-0.60	1.60	—	1.80*
Белгородская область	1987	-0.14	-0.13	0.07	0.08	-2.80*	-2.60*	1.40*	1.60*
Каштановые почвы (Kastanozems)									
Бурятия, Улан-Удэ	1967	-0.26	-0.15	0.06	-0.06	-7.02*	-4.05*	1.62*	-1.62*
Лугово-бурые почвы (Albic Stagnic Luvisol)									
Хабаровский край	1965	-0.46	-0.17	-0.23	-0.29	-12.42*	-4.59*	-6.21*	-7.83*
без известкования с известкованием	1941	-0.52	-0.23	0.12	-0.06	-14.04*	-6.21*	0.12	-1.62*
Приморский край	1941	-0.48	-0.32	—	-0.21	-12.96*	-8.64*	—	-5.67*
Лугово-черноземовидные почвы (Luvic Greyzemis Stagnic Phaeozem)									
Амурская область	1964	-0.70	-0.81	—	-0.58	-18.90*	-21.87*	—	-15.66*

* Достоверные изменения содержания и запасов $S_{орг}$ при $p < 0.05$ указаны по данным работ авторов, приведенных в табл. 1.

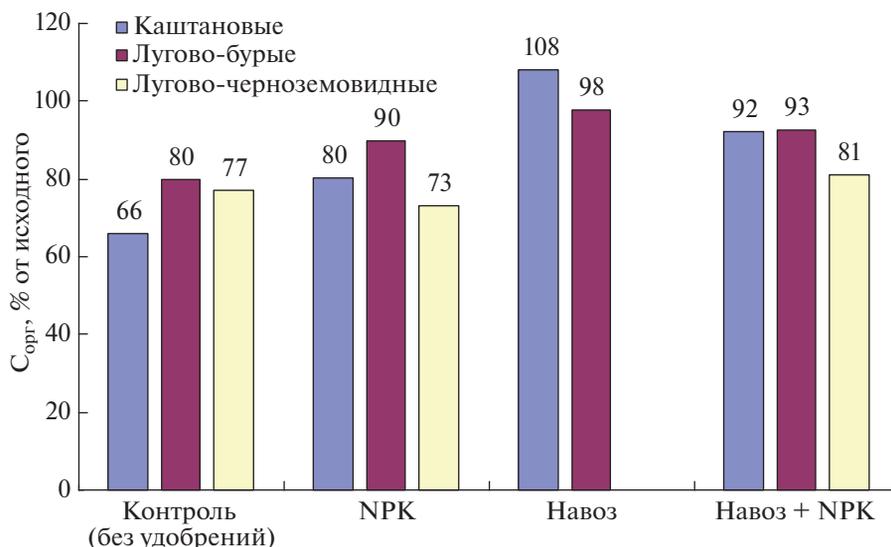


Рис. 5. Изменение относительного содержания $C_{орг}$ в каштановых почвах, лугово-бурых и лугово-черноземовидных по сравнению с исходным уровнем (до закладки опытов, обобщенные данные).

ванием подзолистого горизонта, что в свою очередь вызвало резкое подкисление и снижение содержания $C_{орг}$. В 5–8 ротациях темпы уменьшения запасов гумуса значительно замедлились в вариантах с внесением удобрений, в то время как на контроле продолжалась значительная убыль $C_{орг}$.

Подобные тенденции отмечаются на дерново-подзолистых легко- и среднесуглинистых почвах в опытах Ижевской ГСХА Удмуртской Республики и Смоленского НИИСХ Смоленской области [6, 19]. Наибольшее уменьшение содержания почвенного органического углерода в этих опытах отмечается в контрольных вариантах (-0.39 – 0.40% $C_{орг}$), наименьшее – при органо-минеральной системе удобрения (-0.10 – 0.26% $C_{орг}$). Следует отметить, что запасы органического вещества в пахотном слое почвы (0–20 см) без внесения удобрений существенно снизились на 10.5–10.8 т/га, при органо-минеральной системе – 2.7–7.0 т/га (табл. 3)

В опыте Бурятского НИИСХ, заложенном на каштановой почве в 1967 г., темпы снижения $C_{орг}$ (табл. 3) в варианте без удобрений сохранялись высокими как в первые десятилетия после закладки эксперимента, так и в начале 2000-х годов ($\Delta C = -0.005\%/год$). Во многом это связано с засушливыми условиями, ветровой эрозией, глубоким промерзанием зимой почвенного профиля, а также ведением севооборота с чистым паром. Только внесение навоза из расчета 5 т/га севооборотной площади обеспечило за 50 лет достоверный прирост запасов почвенного углерода на 1.6 т/га [5].

Орошение чернозема обыкновенного карбонатного в опыте Кабардино-Балкарском научном центре РАН (г. Нальчик) увеличивает убыль содержания гумуса по сравнению с возделыванием культур на богаре, уменьшая его величины по срав-

нению с исходным уровнем на 0.06–0.23% [16]. Вероятно, при оптимизации уровня влажности почвы в условиях повышенных температур усиливается минерализация почвенного органического вещества.

Следует отметить значительные потери $C_{орг}$ (-0.21 – 0.58%) на лугово-бурых почвах без известкования, а также на лугово-черноземовидных почвах юга Дальнего Востока в вариантах с внесением навоза и NPK [27]. Изначально высокий уровень содержания $C_{орг}$, большая насыщенность севооборотов соей и пшеницей в условиях повышенного, иногда избыточного увлажнения при сравнительно высоких температурах в летний период являются причинами дегумификации почв, которая продолжается даже при органо-минеральных системах удобрения.

По данным [41], при исходном высоком содержании $C_{орг}$ в почве оно может уменьшаться, пока не будет достигнут новый уровень, даже если дозы органических удобрений рассчитаны в соответствии с бездефицитным балансом гумуса. Таким образом, исходное содержание $C_{орг}$ и последующие механические обработки, орошение, особенности климата и другие факторы могут иметь решающее влияние на направленность и скорость изменения содержания гумуса в почве.

Обратная тенденция – увеличение содержания $C_{орг}$ отмечена в опыте ВНИИ кормов, заложенном на дерново-подзолистой среднесуглинистой почве [14]. Здесь в 1947 г. на суходоле временного избыточного увлажнения была высеяна травосмесь для создания пастбищной агроэкосистемы на основе клевера лугового (*Trifolium pratense* L.), клевера ползучего (*Trifolium repens* L.), тимофеевки луговой (*Phleum pratense* L.), овсяни-

Таблица 4. Изменение содержания и запасов $C_{\text{орг}}$ в пахотном слое почв (0–20 см) в 15 длительных опытах России при внесении органических удобрений по сравнению с контролем (без удобрений)

Тип почвы	Место проведения опытов	Различие в содержании (запасов) углерода между вариантом с органическими удобрениями и контролем		Увеличение запасов $C_{\text{орг}}$, % от контроля
		абс. %	т/га	
Дерново-подзолистые	Владимирская область	0.13	3.5	23*
	Брянская область	0.27	7.3	28*
	Тверская область	0.15	4.1	26*
	Смоленская область	0.00	0.0	0
	Удмуртская республика	0.05	1.4	6
	Москва, ДАОС	0.44	11.9	63*
	Пермский край	0.06	1.6	5
	Московская область, СШ-5	0.12	3.2	16*
Серые лесные	Владимирская область	0.21	5.7	13*
	Курганская область	–0.04	–0.8	–1
Черноземы выщелоченные, обыкновенные, типичные	Омск	0.11	2.2	3
	Белгородская область	0.21	4.2	7*
Каштановые	Улан-Удэ	0.32	8.6	64*
Лугово-бурые	Хабаровский край			
	без известкования	0.41	11.1	21*
	с известкованием	0.46	12.4	22*
Среднее		0.19	5.0	20

* Указано достоверное увеличение (уменьшение) запасов $C_{\text{орг}}$, % от контроля (без удобрений), при $p < 0.05$ (на основании расчетов, проведенными авторами).

цы луговой (*Festuca pratensis* Huds), лисохвоста лугового (*Alopecurus pratensis* L.), костреца безостого (*Bromus inermis* Leyss.) и мятлика лугового (*Poa pratensis* L.). Спустя 66 лет, во всех вариантах опыта отмечено увеличение содержания почвенного органического вещества: на 0.38% в контроле и на 0.50–0.76% при внесении НРК и навоза. По данным авторов, использование ФАР (фотосинтетически активная радиация) фитомассой пастбищных трав на контроле составляла 0.25%, при раздельном внесении $N_{120(40-40-40)}P_{45}K_{90}$ (в виде трех подкормок за вегетацию) и навоза (20 т/га) – 0.78 и 0.43% соответственно, а при совместном внесении использование ФАР составляло 0.71%.

Большое накопление поукосно-корневых остатков, отсутствие механической обработки почвы в условиях оптимального увлажнения явилось одной из причин увеличения содержания $C_{\text{орг}}$ в луговой агроэкосистеме даже без внесения удобрений. Среднегодовой прирост $C_{\text{орг}}$ в данных условиях составлял 0.0057% на контроле и 0.0076 и 0.0115% при внесении минеральных и органических удобрений соответственно (табл. 3).

Во всех остальных опытах наблюдалось заметное уменьшение содержания $C_{\text{орг}}$ в контроле, за исключением Курганского НИИСХ [8]. Применение НРК приводило к увеличению $C_{\text{орг}}$ по сравнению с исходным уровнем в 8 опытах, а навоза и его совместного использования с НРК – в 12 опытах из 23 (табл. 4).

В дерново-подзолистых почвах длительных полевых опытов Геосети убыль углерода в контрольном варианте идет наиболее быстро – в среднем теряется около 15% $C_{\text{орг}}$ от исходного уровня. Применение минеральных удобрений уменьшает темпы сокращения содержания почвенного органического углерода, но полностью остановить его не могут. Только органические и органо-минеральные системы удобрения обеспечивают устойчивое равновесие между минерализацией и поступлением углерода в почву (рис. 4).

Проведение известкования на серых лесных почвах (в опыте Владимирского НИИСХ) стабилизирует содержание $C_{\text{орг}}$ практически на исходном уровне (96%), а применение минеральных и органических удобрений способствует увеличению содержания углерода в почве на фоне известкования на 5–8%, при совместном внесении навоза и НРК – на 18% [23]. Изменение первоначального уровня $C_{\text{орг}}$ в черноземах выщелоченных, обыкновенных, типичных под действием удобрений имеет общие тенденции. В целом они обладают большей устойчивостью к дегумификации при длительной 27–67-летней эксплуатации почв без применения удобрений. Так, средняя убыль $C_{\text{орг}}$ за это время, по обобщенным данным, составляет для контрольного варианта 7–13% от первоначального уровня. Внесение минеральных удобрений хоть и уменьшает среднегодовые потери углерода, но полностью их не компенсирует. Толь-

ко применение навоза и его сочетание с NPK способствует стабилизации содержания почвенного органического вещества в черноземах на исходном уровне [4, 8, 9, 16, 21, 22, 27, 32].

В условиях засушливого климата каштановые почвы являются наименее устойчивыми к дегумификации, теряя в варианте без удобрений 1/3 от первоначального содержания углерода. Только применение органических удобрений способствует сохранению $C_{орг}$ [33].

В длительных опытах, заложенных на юге Дальнего Востока, отмечается заметное уменьшение содержания углерода с момента закладки опытов (рис. 4). Этому способствует муссонный климат с теплым и в некоторые периоды лета избыточным увлажнением, с холодной малоснежной весной, в результате происходит глубокое промерзание почвенного профиля. При этом органические и органо-минеральные системы удобрений несколько снижают скорость дегумификации. В опытах ВНИИ сои в Амурской области на лугово-черноземовидных почвах количество гумуса уменьшалось быстрее, чем на лугово-бурых почвах Приморского и Хабаровского краев, причем максимальное уменьшение (на 27%) отмечено в варианте с применением минеральных удобрений [27].

Следует отметить, что лугово-черноземовидные и лугово-бурые почвы наряду с каштановыми являются наименее устойчивыми к дегумификации и нуждаются в обязательном применении удобрений, в первую очередь органических.

Для оценки экологического значения органических удобрений, необходимо учитывать количество углерода, накапливаемого в почве, а также эффективность накопления $C_{орг}$. После того, как в почве достигнуто устойчивое равновесие, количество $C_{орг}$, ежегодно вносимого с органическими удобрениями, поддерживает устойчивый уровень органического вещества и соответствует количеству минерализованного углерода в год [41]. Нами проведена оценка запасов почвенного органического углерода в неудобренной почве и при внесении навоза в дозе ≈ 10 т/га в год и оценен вклад органических удобрений в накопление $C_{орг}$ по сравнению с контролем (табл. 4). Как показывают данные, различие в запасах углерода в пахотном слое почвы (0–20 см) между вариантами без удобрений и навоз в среднем для дерново-подзолистых почв составляло 21% (с колебаниями от 0 до 63%), серых лесных – 13%, черноземов – 3% (от –1 до 7%), лугово-бурых почв – 21.5% (21–22%). Наибольшее накопление углерода отмечается при внесении навоза в условиях засушливой степи на каштановой почве – 63%. В целом по всем опытам увеличение запасов углерода при внесении навоза в дозе ≈ 10 т/га по сравнению с неудобренной почвой составляют 20%. Полученные дан-

ные полностью согласуются с данными длительных полевых опытов в Европе [35, 41–43]. В то же время необходимо отметить, что разные типы почв существенно отличаются по исходному содержанию углерода, поэтому одинаковый прирост, выраженный в процентах, может давать большие различия при пересчете в тонны на гектар. По разнице в накоплении $C_{орг}$ (в т/га, в слое 0–20 см) при внесении органических удобрений по сравнению с контролем почвы можно расположить в следующий убывающий ряд: лугово-бурые (11.8 т/га) > каштановые (8.6) > серые лесные (5.7) > дерново-подзолистые (4.1) > черноземы (1.9 т/га). Такое увеличение запасов $C_{орг}$ при внесении навоза способствует поддержанию содержания углерода на уровне, близком к исходному, практически во всех анализируемых длительных опытах Геосети. Следует отметить исключительно важное влияние органических удобрений на стабилизацию содержания органического вещества в экстремальных климатических условиях сухостепной зоны на каштановой почве и при муссонном климате на лугово-бурых почвах. Наименьшее различие в накоплении углерода отмечается при внесении навоза на черноземах, что, видимо, объясняется исходно высокими запасами гумуса (до 600–700 т/га), большой устойчивостью почвенного органического вещества, а также несколько меньшими дозами внесения навоза. Кроме того, в черноземной зоне преобладают зернопаропашные севообороты с сахарной свеклой и кукурузой, что наряду с наличием в них чистого пара способствует усилению минерализации органического вещества навоза по сравнению с опытами, проведенными в других почвенно-климатических условиях.

Согласно обобщениям 21-го длительного стационарного опыта Геосети ВНИИА, за минимальное содержание углерода в почве можно принять его количество в вариантах без удобрений (контроль). Именно в них отмечается наименьшее содержание $C_{орг}$, и как следствие минимальная урожайность культур севооборотов. За оптимальное содержание углерода в почве ($C_{опт}$) можно принять варианты с наибольшим содержанием $C_{орг}$ (табл. 2). При этом убыль почвенного органического углерода по сравнению с исходным уровнем должна быть минимальной, с поддержанием устойчивого (квазиравновесного) содержания углерода в почвах [26, 30]. Этим условиям соответствуют в большинстве опытов Геосети варианты с органо-минеральной системой удобрения, где наряду со стабилизацией содержания почвенного органического углерода отмечается наибольшая продуктивность севооборотов. Уровни минимального и оптимального содержания $C_{орг}$ в почвах можно принять как эталонные для каждого типа почв с учетом применяемой системы удобрения.

Следует отметить, что полученные в длительных опытах величины $C_{\text{опт}}$ несколько меньше существующих градаций по степени гумусированности [20]. В большинстве опытов почвы можно отнести к слабо- и среднегумусированным. Наиболее объективные данные приведены в работах [11, 26], в которых классы учитывают не только тип почвы и гранулометрический состав, но и увязаны с природно-климатическими особенностями регионов Российской Федерации. В то же время значения классов по степени гумусированности не всегда отвечают реальным данным, многие оценки C_{min} , приведенные в статье [11], являются экспертными. Именно поэтому, на наш взгляд, наиболее объективно оценить изменение степени гумусированности почв возможно только при мониторинге в длительных стационарных полевых опытах на основных типах почв различного гранулометрического состава. При этом следует отметить, что уточнение минимально допустимого, критического, содержания гумуса в почвах возможно в большинстве многолетних стационарных полевых опытах Геосети путем закладки вариантов с бессымным чистым паром. Например, как предлагается в работе [11] на старопашотной почве, находящейся вблизи стационарного опыта, что позволит быстро, через 10–15 лет парования, установить близкий к реальному уровень C_{min} .

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе анализа 21-го длительного стационарного эксперимента, проводимого в рамках Географической сети полевых опытов с удобрениями в России, выявлены следующие географические закономерности эффективности удобрений. В европейской части России продуктивность севооборотов увеличивается с севера на юг в ряду почв: дерново-подзолистые < серые лесные < черноземы (выщелоченные, обыкновенные, южные), при этом наибольшая продуктивность севооборотов обеспечивает органо-минеральная система удобрений. В сухостепных условиях Забайкалья урожайность резко уменьшается, ее наибольшая величина достигается при раздельном внесении органических и минеральных удобрений. На юге Дальнего Востока более продуктивными являются лугово-бурые почвы по сравнению с лугово-черноземовидными. В условиях муссонного климата эффективность органо-минеральных систем удобрения равна минеральной.

В длительных полевых экспериментах отмечались большие различия в содержании $C_{\text{орг}}$ между опытами даже в пределах одного типа почв, которое колебалось в диапазоне 0.5–4.16%. В 18 опытах наибольшая разница между минимальным и максимальным содержанием $C_{\text{орг}}$ наблюдалась между контролем и органо-минеральной системой удоб-

рения, в трех опытах – между контролем и органической системой. Достоверные различия в содержании почвенного органического углерода между вариантами без удобрения и навоз + NPK в четырех опытах были <10 отн. %, в шести – 11–20% и в десяти – >20%.

На дерново-подзолистых, серых лесных и черноземных почвах наибольшая убыль органического вещества отмечалась в контрольном варианте. Минеральные удобрения уменьшали потерю $C_{\text{орг}}$ почвами, но полностью их не компенсировали, за исключением серых лесных почв. Органическая и органо-минеральная системы способствовали стабилизации содержания углерода в почвах. При этом лугово-черноземовидные и лугово-бурые почвы наряду с каштановыми являются наименее устойчивыми к дегумификации и нуждаются в обязательном применении удобрений, в первую очередь органических.

Выявлены уровни минимального (в варианте без удобрений) и оптимального (при совместном внесении органических и минеральных удобрений) содержания $C_{\text{орг}}$ в изучаемых опытах Геосети ВНИИА, которые можно принять как эталонные для каждого типа почв и разновидности по гранулометрическому составу с учетом применяемой системы удобрения.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алиев А.М., Самойлов Л.Н., Цимбалист Н.И. Эффективность комплексного применения средств химизации в Нечерноземной зоне (итоги 55 лет исследований в длительном полевом опыте) // *Агротехника*. 2016. № 2. С. 20–30.
2. Белоус Н.М., Сычев В.Г., Шаповалов В.Ф., Белоус И.Н. Влияние длительного применения средств химизации на продуктивность плодосменного севооборота и плодородие дерново-подзолистой почвы в условиях радиоактивного загрязнения // *Плодородие*. 2013. № 3. С. 1–3.
3. Бижоев В.М. Обоснование оптимальной системы удобрения в зернопропашном севообороте на черноземе обыкновенном при орошении в степной зоне Центрального Предкавказья. Автореф. дис. ... докт. с.-х. наук. Владикавказ, 2006. 50 с.
4. Бижоева Т.П., Бижоев Р.В. Использование результатов длительных полевых опытов с удобрениями для разработки стратегии получения урожая сельскохозяйственных культур и сохранения и воспроизводства плодородия чернозема обыкновенного карбонатного степной зоны Центрального Предкавказья // *Устойчивое развитие: проблемы, концепции, модели*. Мат.-лы Всерос. конф., 2017. С. 280–284.
5. Билтуев А., Будажапов Л.В., Лапухин Т.П. Динамика изменения гумуса в каштановых почвах Запад-

- ного Забайкалья при длительном применении удобрений // Плодородие. 2017. № 3. С. 8–10.
6. *Бортник Т.Ю.* Агрохимические основы воспроизводства плодородия дерново-подзолистых почв и повышения продуктивности агроценозов в Вятско-Камской земледельческой провинции. Автореф. дис. ... д. с.-х. н. М., 2019. 46 с.
 7. *Будажанов Л.В., Билтуев А.С., Уланов А.К.* Влияние различных систем удобрений на продуктивность культур зернопарового севооборота при систематической засухе в условиях сухой степи Бурятии // Итоги выполнения программы фундаментальных научных исследований государственных академий на 2013–2020 гг. 2018. С. 31–39.
 8. *Волынкин В.И., Волынкина О.В., Копылов А.Н.* Изменение почвенного плодородия при длительном применении удобрений в Курганской области // Агрохимия. 2019. № 8. С. 3–13.
 9. *Воронкова Н.А., Балабанова Н.Ф.* Влияние длительного применения удобрений в зернотравяном севообороте на агрохимические свойства чернозема выщелоченного и урожайность сельскохозяйственных культур // Достижения науки и техники АПК. 2013. № 5. С. 30–32.
 10. *Ковшик И.Г., Науменко Е.Т., Науменко А.В.* Длительное удобрение лугового-черноземовидной почвы и урожайность сои // Земледелие. 2011. № 1. С. 19.
 11. *Козут Б.М.* Оценка содержания гумуса в пахотных почвах России // Почвоведение. 2012. № 9. С. 944–952.
 12. *Косолапова А.И., Рафхатовна Я.В., Тагирьянова В.М.* Влияние систем удобрения на продуктивность севооборотов, агрохимические показатели дерново-подзолистых почв Пермского края и накопления в них тяжелых металлов (по материалам длительных опытов) // 75 лет Географической сети опытов с удобрениями. Мат-лы Всерос. совещ. М.: ВНИИА, 2016. С. 121–127.
 13. *Кузьменко Н.Н.* Баланс элементов питания в почве и продуктивность льняного севооборота при разной насыщенности удобрениями // Агрохимия. 2016. № 11. С. 25–30.
 14. *Кулаков В.А., Алтунин Д.А.* Эффективность длительного (69 лет) применения минеральных и органических удобрений на суходольных пастбищах Нечерноземной зоны // 75 лет Географической сети опытов с удобрениями. Мат-лы Всерос. сов. М.: ВНИИА, 2016. С. 148–153.
 15. *Литвинский В.А., Муравин Э.А., Черников В.А., Грицевич Ю.Г., Игнатов В.Г., Хлыстовский А.Д.* Продуктивность севооборота с клеверным паром и агрохимические свойства дерново-подзолистой почвы в длительном (с 1931 г.) опыте Д.Н. Прянишникова № 2 на ДАОС // Агрохимия. 2010. № 8. С. 15–30.
 16. *Лифаненкова Т.П., Бижоев Р.В.* Влияние систематического применения удобрений в условиях богары и при длительном орошении на урожайность культур, продуктивность зернотравянопропашного севооборота и плодородие чернозема обыкновенного карбонатного в агроландшафтном земледелии Центрального Предкавказья // Агрохимия. 2018. № 4. С. 3–17.
 17. *Лукин С.М.* Агрэкологическое обоснование систем применения удобрений в севооборотах на дерново-подзолистых супесчаных и песчаных почвах. Автореф. дис. ... д. б. н. М., 2009. 46 с.
 18. *Мерзлая Г.Е.* Биологические факторы в системах удобрения // Агрохимия. 2017. № 10. С. 24–36.
 19. *Мерзлая Г.Е., Зябкина Г.А., Фомкина Т.П., Козлова А.В., Макшакова О.В., Волошин С.П., Хромова О.М., Панкратенкова И.В.* Эффективность длительного применения органических и минеральных удобрений на дерново-подзолистой легкосуглинистой почве // Агрохимия. 2012. № 2. С. 37–46.
 20. Методические указания по проведению комплексного мониторинга плодородия почв земель сельскохозяйственного назначения / Под ред. Державина Л.М., Булгакова Д.С. М., 2003. С. 184–187.
 21. *Минакова О.А., Александрова Л.В., Подвигина Т.Н.* Влияние последствий удобрений на урожайность культур в зернопаропропашном севообороте лесостепи ЦЧР // Агрохимия. 2019. № 8. С. 18–23.
 22. *Минакова О.А., Тамбовцева Л.В., Громовик А.И.* Влияние длительного применения минеральных удобрений и навоза на гумусное и азотное состояние чернозема выщелоченного в зерносвекловичном севообороте лесостепи ЦЧЗ // Агрохимия. 2011. № 5. С. 18–25.
 23. *Окорков В.В., Фенова О.А., Окоркова Л.А.* Приемы комплексного использования средств химизации в севообороте на серых лесных почвах Верхневолжья в агротехнологиях различной интенсивности. Суздаль, 2017. 176 с.
 24. Оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. Общее резюме. М.: Росгидромет, 2008. С. 9.
 25. *Рябец В.К., Федорова Т.Н., Асеева Т.А.* Динамика агрохимических показателей плодородия почв в Хабаровском крае и оценка влияния систем удобрений на качественное состояние земель // Динамика показателей плодородия почв и комплекс мер по их регулированию при длительном применении систем удобрения в разных почвенно-климатических зонах. Мат-лы Междунар. научн. конф. М.: ВНИИА, 2018. С. 78–87.
 26. *Семенов В.М., Козут Б.М.* Почвенное органическое вещество. М.: ГЕОС, 2015. 233 с.
 27. *Синеговская В.Т., Науменко Е.Т.* Плодородие почвы и продуктивность зерно-соевого агроценоза при длительном внесении удобрений // 75 лет Географической сети опытов с удобрениями. Мат-лы Всерос. совещ. М.: ВНИИА, 2016. С. 237–242.
 28. *Сычев В.Г., Листова М.П., Рухович О.В., Романенков В.А.* Научные основы, состояние и рекомендации применения удобрений в Северо-Кавказском регионе // Бюл. Геосети опытов с удобрениями. М.: ВНИИА, 2007. Вып. 4. С. 11–17.
 29. *Сычев В.Г., Романенков В.А., Беличенко М.В.* Значение Географической сети опытов с удобрениями для решения современных проблем сельскохозяйственного производства // 75 лет Географической сети опытов с удобрениями. Мат-лы Всерос. совещ. М.: ВНИИА, 2016. С. 3–10.
 30. *Сычев В.Г., Шевцова Л.К., Мерзлая Г.Е.* Исследования динамики и баланса гумуса при длительном применении систем удобрения на основных типах почв // Агрохимия. 2018. № 2. С. 3–21.
 31. *Тимошинов Р.В., Кушаева Е.Ж.* Изменение продуктивности сельскохозяйственных культур и плодородия почвы при длительном применении различных систем удобрений в полевом севообороте в

- условиях Приморского края // Итоги выполнения программы фундаментальных научных исследований государственных академий на 2013–2020 гг. М., 2018. С. 299–307.
32. Тютюнов С.И., Солнцев П.И., Шаповалов Н.К., Хорошилова Ю.В., Горохова Ж.Ю., Каторгин Д.И., Емец М.В. Результаты изучения технологий применения средств химизации в зернопропашном севообороте // Итоги выполнения программы фундаментальных научных исследований государственных академий на 2013–2020 гг. М., 2018. С. 307–319.
 33. Уланов А.К., Будажапов Л.В. Продуктивность каштановой почвы в зависимости от условий увлажнения при многолетнем воздействии севооборотов, приемов основной обработки и удобрений в сухой степи // Земледеле. 2019. № 1. С. 15–18.
 34. Шевцова Л.К. Современные направления в исследовании органического вещества почв в длительных опытах // Проблемы агрохимии и экологии. 2009. № 3. С. 39–47.
 35. Blanchet G., Gavazov K., Bragazza L., Sinaj S. Responses of soil properties and crop yields to different inorganic and organic amendments in a Swiss conventional farming system // Agric. Ecosyst. Environ. 2016. V. 230. P. 116 <https://doi.org/10.1016/j.agee.2016.05.032>
 36. Birkhofer K., Bezemer T.M., Bloem J., Bonkowski M., Christensen S., Dubois D., Ekelund F. et al. Long-term organic farming fosters below and aboveground biota: implications for soil quality, biological control and productivity // Soil Biol. Biochem. 2008. V. 40. P. 2297–2308. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2008.05.007>
 37. Edmeades D.C. The long-term effects of manures and fertilizers on soil productivity and quality: a review // Nutr. Cycling Agroecosystems. 2003. V. 66. № 2. P. 165–180.
 38. Janzen H.H. Long-term ecological sites: musings on the future, as seen (dimly) from the past // Global Change Biology. 2009. V. 15. P. 2770–2778.
 39. Kätterer T., Börjesson G., Kirchmann H. Changes in organic carbon in topsoil and subsoil and microbial community composition caused by repeated additions of organic amendments and N fertilisation in a long-term field experiment in Sweden // Agric. Ecosyst. Environ. 2014. V. 189. P. 110–118. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2014.03.025>
 40. Korschens M. Soil organic carbon (Corg) – importance, determination, evaluation // Arch Agron Soil Sci. 2010. V. 56. P. 375–392 (in German).
 41. Korschens M. et al. Effect of mineral and organic fertilization on crop yield, nitrogen uptake, carbon and nitrogen balances, as well as soil organic carbon content and dynamics: results from 20 European long-term field experiments of the twenty-first century // Archives of Agronomy and Soil Science. 2013. V. 59. P. 1017–1040. <https://doi.org/10.1080/03650340.2012.704548>
 42. Lützw M.V., Kögel-Knabner I., Ekschmitt K., Matzner E., Guggenberger G., Marschner B., Flessa H. Stabilization of organic matter in temperate soils: mechanisms and their relevance under different soil conditions a review // Eur. J. Soil Sci. 2006. V. 57. P. 426–445. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.2006.00809>
 43. Maltas A., Charles R., Jeangros B., Sinaj S. Effect of organic fertilizers and reduced-tillage on soil properties, crop nitrogen response and crop yield: results of a 12-year experiment in Changins, Switzerland // Soil Tillage Res. 2013. V. 126. P. 11–18. <https://doi.org/10.1016/j.still.2012.07.012>

Influence of Fertilizer Systems on the Soil Organic Carbon Content and Crop Yields: Results of Long-Term Field Experiments at the Geographical Network of Research Stations in Russia

V. G. Sychev¹, A. N. Naliukhin^{1,*}, L. K. Shevtsova¹, O. V. Rukhovich¹, and M. V. Belichenko¹

¹*Pryanishnikov All-Russia Research Institute of Agrochemistry, Moscow, 127434 Russia*

**e-mail: naliukhin@yandex.ru*

In this paper, the results of long-term experiments (LTEs) performed at the geographical network of experimental stations encompassing the major types of agricultural soils in Russia (soddy-podzolic (Retisols, Luvisols, and Podzols); gray forest (Luvic Greyzemic Phaeozems); leached, typical, and southern chernozems (Chernozems); chestnut soils (Kastanozems); meadow brown soils (Albic Stagnic Luvisols); and meadow chernozem-like soils (Luvic Greyzemic Stagnic Phaeozems)) within the entire country (from the north to the south of the European part of Russia, Siberia, and south of the Far East region (Amur oblast, Khabarovsk, and Primorsk regions)) are summarized. Most of the stationary LTEs have a duration of 20–45 years; ten LTEs have a duration from 50 to 81 years. It was found that the organomineral fertilizer system (OMFS) exceeds the mineral fertilizer system (MFS) in its effect on the yield by 1–40% in 18 experiments, while the MFS is more efficient than the OMFS by 2–3% in only three LTEs. Within the same soil type, differences in the Corg content between unfertilized trials reach 0.56–1.55% for soddy-podzolic soils and 1.58–3.93% for chernozems. Differences in the soil Corg content between the unfertilized and OMFS (manure + NPK) trials are less than 10% in four LTEs, 11–20% in six LTEs, and > 20% in ten LTEs; the average difference reaches 0.27% of Corg. The levels of minimum (C_{min}) and optimum (C_{opt}) carbon content have been determined with due account for the soil types, soil texture classes, and the applied fertilizer system. They can be used as reference values for the studied soils.

Keywords: long-term field experiments (LTEs), Geographic network of experiments with fertilizers, soil organic carbon, productivity, fertilizer systems