

**Федеральное агентство научных организаций
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт физико-химических и биологических проблем почвоведения
РАН**

На правах рукописи

ЗИНЯКОВА Наталья Борисовна

**АКТИВНОЕ ОРГАНИЧЕСКОЕ ВЕЩЕСТВО В СЕРОЙ
ЛЕСНОЙ ПОЧВЕ ПРИ ОРГАНИЧЕСКОЙ И
МИНЕРАЛЬНОЙ СИСТЕМАХ УДОБРЕНИЯ**

Специальность 06.01.04 – агрохимия

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание ученой степени кандидата биологических наук

Научный руководитель:
доктор биологических наук
Семенов В.М.

Пушино 2014

СОДЕРЖАНИЕ	Стр.
ВВЕДЕНИЕ	5
ГЛАВА 1. ВЛИЯНИЕ ТРАДИЦИОННОЙ И ОРГАНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ЗЕМЛЕДЕЛИЯ НА ЭКОЛОГО-БИОГЕОЦЕНОТИЧЕСКИЕ ФУНКЦИИ ПОЧВЫ (ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ)	10
1.1. Основные принципы органического земледелия и мировые тенденции его развития	15
1.2. Сравнительный анализ влияния органической и традиционной систем земледелия на урожай культур, агрохимические и биологические свойства почвы	22
1.2.1. Влияние органической системы применения удобрения на урожай и качество продукции	23
1.2.2. Агрохимические показатели и баланс питательных элементов при разных системах земледелия	27
1.2.3. Влияние систем удобрения на биологические параметры почвы и биоразнообразие	30
1.3. Содержание и качество органического вещества в почве при разных системах земледелия	33
1.3.1. Уровни содержания органического вещества в почве	34
1.3.2. Содержание и качество органического вещества почвы в разнородноудобренных агроценозах	39
1.4. Перспективы развития органического земледелия	51
1.5. Заключение	54
ГЛАВА 2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ	57
2.1. Объекты исследований	57
2.1.1. Климатические условия, почвенный покров и морфогенетическая характеристика серых лесных почв	57

2.1.2. Порядок отбора почвенных проб в полевых условиях на участках пашни и залежи	61
2.1.3. Условия проведения микрополевого опыта	66
2.2. Методы исследования	68
2.2.1. Определение физико-химических свойств почвы	68
2.2.2. Определение активного органического вещества почвы	69
ГЛАВА 3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ	74
3.1. Агрохимические свойства серой лесной почвы при разных системах удобрения и внесении возрастающих доз минеральных и органических удобрений	74
3.1.1. Влияние системы удобрения на pH и питательный режим почвы	74
3.1.2. Изменения валового содержания органического вещества в почве при систематическом применении минеральных и органических удобрений	80
3.1.3. Заключение	84
3.2. Уровни содержания активного органического вещества в серой лесной почве	85
3.2.1. Влияние минеральной, органо-минеральной и органической системы на содержание активного органического вещества в почве	86
3.2.2. Влияние возрастающих доз минеральных и органических удобрений на обеспеченность почвы активным органическим веществом	89
3.2.3. Заключение	94
3.3. Структура активного пула органического вещества серой лесной почвы	95
3.3.1. Особенности структуры активного пула органического вещества при разных системах удобрения	96
3.3.2. Изменение структуры активного пула органического вещества при внесении возрастающих доз минеральных и органических	100

удобрений	
3.3.3. Заключение	105
3.4. Углеродминерализующая активность серой лесной почвы при разных системах удобрения и внесении возрастающих доз минеральных и органических удобрений	106
3.4.1. Заключение	110
3.5. Соотношение химически экстрагируемых фракций и биологически активного пула в составе почвенного органического вещества	111
3.5.1. Соотношение растворенного, подвижного и активного органического вещества в почве с разными системами удобрения	113
3.5.2. Влияние возрастающих доз минеральных и органических удобрений на соотношение растворенного, подвижного и активного органического вещества в почве	117
3.5.3. Заключение	122
3.6. Определение активного органического вещества в системе агрохимической оценки качества почвы	123
3.6.1. Заключение	127
ВЫВОДЫ	129
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	131
ПРИЛОЖЕНИЕ	153

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность проблемы. Производство растениеводческой продукции в объемах достаточных для обеспечения населения полноценным и безопасным питанием, поддержание стабильности производственного процесса и его устойчивости к глобальным изменениям природной среды и климата, уменьшение объемов эмиссии парниковых газов в атмосферу и повышение углеродсеквестрирующего потенциала агроэкосистем, сохранение биогеоценотических и агропроизводственных функций почвы – агроэкологические приоритеты устойчивого сельского хозяйства. Устойчивое развитие сельского хозяйства достигается использованием систем земледелия, которые более адаптированы к специфическим условиям агроландшафтов, продуктивны, экологически безопасны, биологизированы, рентабельны, технологичны, совместимы с социально-экономическим укладом, чем традиционная система. Эти принципы в наибольшей мере свойственны адаптивно-ландшафтной системе земледелия, получившей распространение в России [Агроэкологическая оценка земель..., 2005], и органической (биологической) системе земледелия [IFOAM, 2014], используемой во многих странах мира наряду с традиционной системой.

Традиционные, адаптивно-ландшафтные и органические системы земледелия могут включать одни и те же мероприятия по организации земельной территории и севооборотов, обработке, охране и мелиорации почвы, но принципиально отличаются по использованию удобрений и борьбе с сорняками, болезнями и вредителями сельскохозяйственных культур. Если традиционные и адаптивно-ландшафтные системы земледелия в зависимости от степени их биологизации предусматривают тотальное или частичное использование минеральных удобрений (минеральная и органо-минеральная системы удобрений) и иных агрохимикатов, то органическое земледелие базируется на применении только органических удобрений и биологических способов защиты растений. Органическое земледелие стало

одним из самых быстрорастущих сегментов сельского хозяйства в мире, а Россия входит в число стран с наибольшей интенсивностью прироста площадей, занимаемых органическим земледелием [The World of Organic Agriculture..., 2013].

Различные аспекты влияния минеральной и органической систем удобрения на минеральное питание культур, величину урожая и его качество, агрохимические свойства почвы и баланс элементов питания в агроценозах, структуру микробного сообщества и биоразнообразие неоднократно рассматривались в исследованиях [Минеев и др., 1993; Mäder et al, 2002; Mäder et al, 2007]. Одним из главных преимуществ органической системы удобрения по сравнению с минеральной системой является стабильное сохранение и устойчивое воспроизводство почвенного органического вещества (**ПОВ**) [Лыков, 1982; Романенков и др., 2009; Шарков, Данилова, 2010; Edmeades, 2003; Marriott, Wander, 2006; Ghosh et al, 2010; Hai et al, 2010; и др.].

Органическое вещество (**ОВ**), формируя и поддерживая основные режимы, свойства и функции почвы, придает ей уникальные свойства эмерджентной системы [Тюрин, 1937; Кононова, 1963; Александрова, 1980, Орлов и др., 2004]. Современное содержание ОВ в почве зависит от большого числа факторов, среди которых система земледелия относится к числу наиболее важных [Когут, 2011; Шарков, 2011; Шарков, Данилова, 2010; Loveland, Webb, 2003; и др.]. Однако вопрос, какая из систем в наибольшей мере отвечает требованию воспроизводства ПОВ и улучшения его качества продолжает оставаться актуальным.

Влияние систем удобрения полевых культур на содержание и качество ПОВ наиболее часто оценивается по валовому содержанию органического углерода ($C_{орг}$) и фракционно-групповому составу гумуса, количеству подвижных и лабильных фракций в его составе (Александрова, 1980; Ганжара, 1998; Завьялова, Кончиц, 2011; Когут, 2003; Овчинникова, 2012; Шевцова, 2009; Шевцова и др., 2012). Менее известными остаются вопросы влияния разных систем удобрения на активное ОВ почвы, к которому

относятся химически и физически незащищенные компоненты высокого энергетического и питательного статуса, потенциально минерализуемые микроорганизмами и расходуемые при агрегации, способные к (био)химическим превращениям со временем существования от менее 3-х до 10 лет [Семенов, Тулина, 2011]. К настоящему времени имеются лишь единичные сведения о влиянии минеральных и органических удобрений на размеры и структуру активного пула ПОВ, ответственного за краткосрочную динамику многих биологических, физических и агрохимических свойств почвы [Кузнецов и др., 2007].

Цель исследований. Определение количественных и качественных изменений органического вещества серой лесной почвы при разных системах удобрения и внесении возрастающих доз минеральных и органических удобрений.

Задачи исследований. 1. Определить влияние длительного применения разных систем удобрения на обеспеченность серой лесной почвы активным органическим веществом.

2. Выявить особенности структуры активного пула органического вещества в серой лесной почве при разных системах удобрения.

3. Получить количественные соотношения между валовым, химически экстрагируемым и активным органическим веществом в серой лесной почве.

4. Оценить сезонную вариабельность содержания активного органического вещества в почве при весеннем и осеннем сроках диагностики.

5. Установить влияние возрастающих норм минеральных и органических удобрений на углеродминерализующую активность серой лесной почвы.

Научная новизна. Определены уровни содержания активного (потенциально-минерализуемого) ОВ в серой лесной почве пахотных и залежных земель в диапазоне гумусированности от минимальной до средней. Показано, что использование органической системы удобрения позволяет поддерживать более высокий уровень обеспеченности серой лесной почвы активным ОВ и сохранять повышенный статус углеродминерализующей

активности почвы по сравнению с минеральной системой. Установлено, что применение органической системы удобрения нормализует структуру активного пула ПОВ, нарушенную при сельскохозяйственном использовании земель. Выявлена строгая зависимость содержания активного ОВ в серой лесной почве от количества вносимых органических удобрений. Получены удельные величины изменения содержания в почве валового и активного ОВ на единицу азота вносимого с минеральным и органическим удобрением. Установлены количественные соотношения между растворенным (солерастворимым), подвижным (щелочно-экстрагируемым) и активным ОВ в серой лесной почве и определены особенности изменения их содержания в зависимости от системы удобрения и вносимых доз. Выявлено, что не все подвижное ОВ является биологически активным, а в растворенном состоянии находится лишь часть активного органического вещества.

Практическая значимость. Результаты исследования могут быть использованы при экспертных оценках объемов почвенной эмиссии диоксида углерода и размеров секвестрации углерода залежными и пахотными землями, а также при разработке мероприятий по оптимизации гумусового состояния почвы. Определены условия оценки состояния ОВ почвы по величине активного пула и его структуре, чувствительным к агрогенным воздействиям. Содержание активного ОВ в почве допустимо определять в образцах почвы как весеннего, так и осеннего сроков отбора, а оценка структуры активного пула требует более строгой привязки к моменту отбора проб в течение сезона. В целях оперативной диагностики обеспеченности серой лесной почвы активным ОВ допустимо использование 20-суточной инкубации с последующим вычислением углерода активного ОВ по кумулятивному количеству $C-CO_2$ с помощью уравнения, полученного опытным путем. Чтобы установить качественные изменения в ПОВ необходимо его биокинетическое фракционирование по результатам длительной инкубации почвенных образцов. В целях коренного улучшения обеспеченности пахотной серой лесной почвы активным ОВ рекомендуется

внесение мелиоративных доз органических удобрений, использование севооборотов с органической системой удобрения или временный перевод в залежь. По полученным удельным величинам можно прогнозировать степень воспроизводства активного ОВ в серой лесной почве на единицу содержащегося в почве валового $C_{\text{орг}}$ или вносимого с удобрением органического материала.

Декларация личного участия. Автором проведено реферирование специальной литературы, подготовлен массив почвенных проб, отобранных на территории Заокского района Тульской области, выполнены текущие работы по закладке и проведению микрополевого опыта, учету урожая и подготовке проб к анализу. С целью биокинетического анализа состояния почвенного органического вещества проведено четыре лабораторных эксперимента с инкубацией 70 вариантов почвенных проб и количественным учетом $C-CO_2$ при продолжительности каждого более чем 150 суток. Автор диссертационной работы лично получала и обрабатывала результаты экспериментов, обобщала экспериментальные данные и сопоставляла их с литературными материалами, формулировала выводы, готовила публикации, представляла исследования на научных конференциях, писала текст настоящей рукописи..

Благодарности. Диссертационная работа выполнена в лаборатории почвенных циклов азота и углерода Института физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН по планам научно-исследовательских работ и в рамках проектов РФФИ (№№11-04-00364-а и 14-04-01575-а). Автор выражает искреннюю признательность заведующему лабораторией, члену-корреспонденту РАН В.Н.Кудеярову, научному руководителю работы, гл.н.с., д.б.н. В.М.Семенову, ст.н.с., к.б.н. А.С.Тулиной, Н.А.Семеновой, Е.М.Гультяевой, ст.н.с., к.б.н. А.К.Ходжаевой, в.н.с., д.б.н. И.Н.Кургановой за полезные консультации и оказанную помощь в проведении экспериментов и интерпретации результатов исследования.

ГЛАВА 1. ВЛИЯНИЕ ТРАДИЦИОННОЙ И ОРГАНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ЗЕМЛЕДЕЛИЯ НА ЭКОЛОГО-БИОГЕОЦЕНОТИЧЕСКИЕ ФУНКЦИИ ПОЧВЫ (ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ)

Почва выполняет пять глобальных функций, поддерживая существование жизни на Земле, обеспечивая постоянное взаимодействие большого геологического и малого биологического круговоротов веществ на земной поверхности, регулируя химический состав атмосферы и гидросферы, контролируя биосферные процессы, аккумулируя активное органическое вещество и связанную с ним химическую энергию [Ковда, Розанов, 1988]. Позднее, обобщая и развивая идеи В.А.Ковды, перечень функций почвы был расширен [Почвы, биогеохимические циклы и биосфера, 2004]. Почве свойственна 1) условная возобновляемость как природного ресурса, 2) способность быть реактором, преобразователем и интегратором комбинированного влияния других природных ресурсов (солнечной радиации, атмосферы, поверхностных и подземных вод, биологических ресурсов). Почва является 3) «сферой взаимодействия», создающей «среду обитания» и местообитание для биоты и «земельным участком» для естественной растительности и культурных посевов, а также 4) средой для продукции биомассы и первичного источника питания в биосфере. Почва поддерживает 5) сохранение тепла, воды и питательных элементов, 6) служит высокостойкой буферной средой, способной предотвратить или смягчить неблагоприятные последствия различных нагрузок, 7) природным фильтром и системой детоксикации, способной защитить более глубокие геологические образования и грунтовые воды от различных загрязнителей. В почве 8) сосредоточен значительный резервуар генов – важный элемент биоразнообразия, а в целом, почва – 9) хранитель наследия истории природы и человека. По Г.В.Добровольскому и Е.Д.Никитину [2006] экологические функции почвы подразделяются на глобальные и биогеоценотические.

Глобальная группа функций почвы включает газовую (атмосферную), гидросферную и литосферную, без которых существование биосферы было бы невозможным. Биогеоценотические функции почвы реализуются благодаря ее особым режимам и совокупности физических, химических и биологических свойств. За счет физических свойств почва представляет собой жизненное пространство, жилище и убежище, механическую опору, депо семян и других зачатков. Химические и физико-химические свойства позволяют быть почве источником элементов питания, влаги и энергии, стимулятором или ингибитором процессов, осуществлять сорбцию тонкодисперсного вещества и микроорганизмов. Информационные функции почвы реализуются посредством регуляции численности, состава и структуры биогеоценоза; сигнала сезонных биологических процессов; пускового механизма развития микробных и растительных сообществ; геологической, климатической и биологической «памяти» биогеоценоза. Целостные функции почвы осуществляются в виде аккумуляции, трансформации и миграции веществ и энергии, дезактивации загрязняющих веществ и болезнетворных микроорганизмов (санитарная функция), буфера и защитного биогеоценотического экрана, условий существования и эволюции организмов. Сочетание перечисленных выше биогеоценотических функций обеспечивает одну из главных функций почвы – ее плодородие. Нарушение одной или нескольких функций может быть причиной деградации плодородия, утраты биоразнообразия, снижения устойчивости экосистемы к внешним воздействиям, ухудшения качества окружающей среды, социально-экономических кризисов. Система земледелия является прямым антропогенным фактором, оказывающим значимое влияние на всю совокупность эколого-биогеоценотических функций почвы.

Каждому периоду развития цивилизации соответствовали свои системы земледелия, в которых проявляется тот или иной способ землепользования и землевладения, сущность которых широко освещены в трудах А.Т. Болотова, И.М. Комова, М.Г Павлова, А.В. Советова, А.Е.

Ермолова, А.Н. Энгельгардта, П.А. Костычева, Д.Н. Прянишникова, В.Р. Вильямса, Я.А. Линовского, С.М. Усова, С.А. Воробьева, В.И. Румянцева, А.С. Ермолова и др. [Дедов, 2001; Беляев, 2004; Баздырев и др., 2008]. Классический труд И.А. Стебута "О земледелии" вышел в свет за 21 год до опубликования в 1809 г. первого тома "Основании рационального сельского хозяйства" А.Д. Тэера, считающегося основателем учения о системах земледелия [Сафонов и др., 2006]. В классификации систем земледелия (табл.1) отражены признаки, по которым определяются в историческом контексте рациональность, интенсивность системы использования земли, поддержания и повышении плодородия почвы.

Таблица 1. Классификация систем земледелия и их признаки [Сафонов и др., 2006]

Типы и виды систем земледелия	Способ использования земли	Способ повышения плодородия почвы
1.Примитивная подсечно-огневая, лесопольная, залежная, переложная	Используется меньшая часть пахотнопригодных земель. Преобладают зерновые культуры.	Природные процессы без участия человека.
2.Экстенсивная паровая, многопольно-травяная	Под посевами половина и более пашни, остальная под паром. Преобладают зерновые и многолетние травы.	Природные процессы, направляемые человеком.
3.Переходная - улучшенная зерновая, травопольная	Пахотнопригодные земли находятся в обработке. Преобладают зерновые культуры, сочетаясь с многолетними травами, пропашными культурами и чистым паром.	Возросшее воздействие человека с использованием природных факторов.
4.Интенсивная плодосменная, промышленно-заводская (пропашная)	Почти все земли заняты посевами. Посевная площадь часто превышает площадь пашни. Введены пропашные культуры.	Активное воздействие человека с помощью средств, поставляемых промышленностью.

С агрономической точки зрения под системой земледелия понимают комплекс взаимосвязанных агротехнических, мелиоративных, почвозащитных и организационно-экономических мероприятий, направленных на эффективное использование земли, агроклиматических ресурсов, биологического потенциала растений с целью получения устойчивых, высоких урожаев сельскохозяйственных культур и воспроизводства плодородия почвы [Земледелие, ГОСТ 16265-89]. Все научно обоснованные системы земледелия должны обеспечивать, с одной стороны, успешную реализацию современных средств производства для получения устойчивого урожая продукции высокого качества, а с другой - защиту окружающей среды от загрязнения тяжелыми металлами, остатками удобрений и пестицидов, т.е. быть экологически безопасными (чистыми).

К концу 20-го столетия интенсивная практика традиционного земледелия (Conventional Farming System) претерпела изменения, но по-прежнему в значительной степени ориентирована на технологии, предусматривающие многократную обработку почвы и интенсивное использование минеральных удобрений и пестицидов [Dufault et al, 2008]. Порождаемые традиционной сельскохозяйственной практикой проблемы деградации почвы, загрязнения окружающей среды и других экологических нарушений привели к разработке более совершенных почвозащитных, контурно-мелиоративных или адаптивно-ландшафтных систем земледелия [Сафонов и др., 2006]. Адаптивно-ландшафтная система земледелия – это система использования земли определенной агроэкологической группы, ориентированная на производство продукции экономически и экологически обусловленного количества и качества в соответствии с общественными (рыночными) потребностями, природными и производственными ресурсами, обеспечивающая устойчивость агроландшафта и воспроизводство почвенного плодородия [Агроэкологическая оценка земель..., 2005]. Одновременно, получили распространение альтернативные системы, такие

как органическое земледелие (Organic Farming System) и земледелие с ограниченными химическими нагрузками (Low-Input Farming System). Термин «органическое земледелие» стал общепринятым в официальной терминологии США, Европейского Союза (ЕС) и многих других стран. Органическое земледелие определяется как система производства, поддерживающая здоровье почв, экосистем и людей, базирующая на экологических процессах, биоразнообразии, гармоничных циклах элементов, адаптированных к местным условиям, использовании безопасных материалов, оптимизации конкурентоспособности культурных растений к сорнякам, болезням и вредителям при полном отказе от использования агрохимикатов и генно-модифицированных организмов [IFOAM, 2013]. В органическом земледелии предусмотрено максимальное использование биологических факторов повышения плодородия почв, подавления болезней, вредителей и сорняков, осуществление комплекса мероприятий, улучшающих условия получения урожая, не оказывающих негативное влияние на окружающую среду. Цель органического сельского хозяйства – получение «экологически чистой» продукции [Григорьян и др., 2011; Григорьян и др., 2013]. Во Франции органическое земледелие обозначается как «экологическое», а в Германии – как «биологическое» [Горчаков, Дурманов, 2002]. Модификациями органического земледелия являются биоорганическая и биодинамическая системы [Минеев и др., 1993; Ковалев, 2006; Fließbach et al, 2007; Mäder et al, 2007; Aronsson et al, 2007; Dawson et al, 2008].

Традиционная, в том числе адаптивно-ландшафтная, и органическая системы земледелия могут включать одни и те же мероприятия по организации земельной территории и севооборотов, обработке, охране и мелиорации почвы, но принципиально отличаются по использованию удобрений и борьбе с сорняками, болезнями и вредителями сельскохозяйственных культур. Если традиционные и адаптивно-ландшафтные системы земледелия в зависимости от степени их

биологизации предусматривают тотальное или частичное использование минеральных удобрений (минеральная и органоминеральная системы удобрений) и иных агрохимикатов, то органическое земледелие базируется на применении только органических удобрений, каковыми являются навоз, компосты, сидераты, растительные остатки, побочные продукты внутрихозяйственной деятельности.

Другая сельскохозяйственная концепция подразумевает интеграцию систем земледелия, т.е. объединение лучшего из традиционного и органического земледелия и разумное использование современных технологий [Trewavas, 2001; Aronsson et al, 2007]. Известны также и другие системы земледелия, как, например, биогеоценотическое и точное [Лыков, 2006; Черкасов и др., 2009].

1.1. ОСНОВНЫЕ ПРИНЦИПЫ ОРГАНИЧЕСКОГО ЗЕМЛЕДЕЛИЯ И МИРОВЫЕ ТЕНДЕНЦИИ ЕГО РАЗВИТИЯ

Целью органического земледелия является обеспечение человечества высококачественными продуктами питания, исключая риск нанесения вреда здоровью и окружающей среде. Принципиальным отличием органической системы земледелия от других систем земледелия является отказ от использования минеральных удобрений и синтетических пестицидов [Edmeades, 2003; Lotter, 2003; Gosling et al, 2005]. При органическом земледелии особое внимание уделяется гармонизации производственных технологий с законами природы, обеспечению экологического императива в хозяйственной деятельности, улучшению условий для симбиотической фиксации азота, использованию местных источников поддержания плодородия почвы, поддержанию баланса между количеством скота и площадью обрабатываемых земель, созданию эффективных севооборотов [Kirchmann et al, 2007].

Эти и другие положения составили блоки основных принципов, на которых базируется биологическое земледелие, приоритетных задач и путей

их достижения (рис. 1). При органическом земледелии предусматривается [Минеев В.Г. и др., 1993, Прижуков и др., 1984]:

1. Знание законов природы и рациональное их использование в интересах человека. Соблюдение научно-обоснованных технологий получения, накопления, хранения и использования органических удобрений путем оптимального сочетания отраслей животноводства и растениеводства.
2. Использование почвозащитных способов обработки почвы. Воспроизводство плодородия почвы, улучшение ее химических, физических и биологических свойств на основе научно обоснованного севооборота и путем реутилизации органических остатков.
3. Максимальное использование биологического азота в агроценозе, активизация путей симбиотической и несимбиотической азотфиксации.
4. Получение продукции высокого биохимического качества и санитарно-гигиенической чистоты, не загрязненной тяжелыми металлами, радионуклидами, пестицидами, и пригодной для диетического питания и длительного хранения.
5. Снижение энергоемкости сельскохозяйственного производства, использование энергосберегающих технологий.
6. Осуществление экологического, санитарно-гигиенического, почвенно-агрохимического контроля за состоянием конкретной агроэкосистемы, обеспечение оптимального количества и соотношения питательных элементов в системе почва – растение.
7. Профессиональная подготовка специалистов, как основа высокой технологической дисциплины.

Органическое сельское хозяйство строится на мировоззрении «единства и неделимости» здоровья почвы, растений, животных и человека [Balfour, 1949, цит. по Trewavas, 2004]. Экономическая эффективность сектора органического сельского хозяйства достигается за счет высоких цен на его продукцию, которые в среднем в 2-3 раза выше, чем продукция традиционной минеральной системы земледелия [Медведева, 2009].



Рис.1. Принципы, задачи биологического земледелия и способы их решения [Минеев и др., 1993].

Становление органического земледелия, как отрасли аграрного сектора тесным образом связано с созданием системы сертификации и контроля, которая предусматривает три этапа: сертификацию продукта, процесса производства и земельного участка, на котором производится данная продукция. Для каждого этапа разработана своя система контроля. Контроль качества органической продукции и процесса ее производства в странах ЕС осуществляется неправительственными организациями – это особенность организации органического земледелия. Ведущей неправительственной организацией является Международная Федерация органического сельского хозяйства (IFOAM). Стандарты определяют основные минимальные «экологические» требования, которые должны быть выполнены в отношении продукции и процесса ее производства в соответствии с маркировкой и соответствующим рынком. Существуют различные рынки экологической продукции со своими индивидуальными требованиями по сертификации, т.е. со своими собственными директивами и стандартами. Некоторые авторы отмечают, что разработанные стандарты сертификации применимы скорее к самому процессу производства сельскохозяйственной продукции, а не к конечному продукту [Watson et al, 2008]. Затрудняет процесс стандартизации органической продукции, процесса ее производства, земельных угодий отсутствие единых международных критериев [Lotter, 2003; Медведева, 2009].

Термином «органическое земледелие» обозначается не столько способ применения органических удобрительных материалов для повышения почвенного плодородия, сколько система организации, управления и ведения сельскохозяйственной деятельности. Концепция «органического земледелия» предусматривала «интегрирование почвы, сельскохозяйственных культур, животных и человека» [Scofield, 1986; Lotter, 2003]. Изначально наибольшее распространение органическое земледелие получило в США, где в 80-90-х гг. XX века 1-2% фермерских хозяйств применяли практику органического земледелия [Drinkwater et al., 1995]. В европейских странах на долю

органического земледелия приходилось 0.1-0.3% хозяйств [Минеев и др., 1993]. В странах ЕС органическое земледелие стало оформляться в автономный сектор аграрной экономики в 1990-1992 гг., когда была определена программа развития этого сектора с соответствующими законодательными актами, определившими его юридический статус и финансированием. Причинами такого решения стали: перепроизводство сельскохозяйственной продукции и проблемы с ее реализацией, озабоченность в обществе негативными экологическими последствиями интенсификации сельскохозяйственного производства, увеличение числа случаев появления на рынке некачественных или опасных для жизни продуктов питания, сокращение доли сельскохозяйственного производства в валовом внутреннем продукте стран [Горчаков, Дурманов, 2002]. В 15 странах ЕС того времени с общей площадью 1.612 млн. га пахотных площадей основной возделываемой культурой была пшеница, которая занимала 18% от общей площади пахотных земель, что позволяет ее считать очень важной культурой для органического сельского хозяйства [Mäder et al, 2007].

Между 1992 и 2003 гг. число сертифицированных угодий с органической системой возросло в странах Мира в среднем на 24%, а органическое земледелие стало одним из самых быстрорастущих сегментов сельского хозяйства [Cavigelli et al., 2008]. По некоторым оценкам доля органического земледелия в сельскохозяйственных угодьях расширяется ежегодно в среднем на 20%, увеличившись за несколько лет с 10 млн. га в 2000 г. до 24-26 млн. га [Mason et al, 2005; Aronsson et al, 2007; Медведева, 2009]. Сельскохозяйственные угодья с органическим земледелием используются как для возделывания культур, так и в виде пастбищ. В Европе с 1990 по 1997 гг. площади сельскохозяйственных культур, возделываемых по органической системе, возросли с 0.24 до 2.0 млн. га [Fließbach et al, 2000, Lampkin 1994]. К 2004 г. в Европе было 38% хозяйств органического земледелия, в Бразилии – 31%, в США и Канаде органическое земледелие

использовалось на 1.4 млн. га, что составило около 5.9% от общей площади «органических» угодий в мире [Araujo et al, 2008; Mason et al, 2005; Willer et al, 2004].

По экспертным оценкам на конец 2011 г. в 162 странах мира органическим земледелием занято 37.2 млн. га, что более чем в 3.4 раза больше по сравнению с 1992 г. (табл. 2). В девяти странах мира органические угодья занимают свыше 1 млн. га, а в десяти странах – более 10% от площади сельскохозяйственных земель.

Таблица 2. Распределение органического земледелия по регионам мира в 2011 г. [The World of Organic Agriculture..., 2013]

Регионы	Количество стран	Доля производства органической продукции, %	Площадь сертифицированных земель, млн. га	Доля от общей площади сельскохозяйственных земель, %
Африка	37	30	1,1	3
Азия	37	34	3,7	10
Европа	46	16	10,6	29
Латинская Америка	29	18	6,8	18
Северная Америка	2	1	2,8	7
Австралия и Океания	11	1	12,2	33

По интенсивности прироста занимаемых органическим земледелием площадей к 2010-2011 гг. лидируют Китай, Индия, Испания, Канада, Франция, Польша, Россия [The World of Organic Agriculture, 2013]. Почти 40% площадей с органическим земледелием занято зерновыми культурами, 35% – кормовыми на зеленый корм, 13% – масленичными и белковыми культурами, 4% – овощными. Расширение площадей органического земледелия и числа производителей привело к расширению рынка

«органической» продукции. В 2002 году глобальный рынок органической продукции составил 23 млрд. долларов США, а к 2004 году Северная Америка и Западная Европа стали крупнейшими потребителями органических продуктов с увеличением продаж до 11.8 и 10.5 млрд. долларов США соответственно [Mason et al, 2005]. В среднем устойчивый рост сертифицированной органической продукции в США и во всем мире составил с начала 90-х годов 20-25% в год, при этом доля органических продуктов в общем объеме производства продуктов питания в США составила около 2%, а в странах ЕС 1-5% [Lotter, 2003]. В Канаде рынок органических продуктов возрастал на 15-20% в год [Mason et al, 2005]. По оценкам 2008 г. годовой прирост продукции органического земледелия составил 20-30%, а торговый оборот достиг 100 млрд. долларов США, к 2020 г. может увеличиться до 200-250 млрд. долларов [Медведева, 2009].

Несмотря на существенное расширение органического земледелия в России, данный вид агропроизводства занимает пока небольшую долю [Григорьян и др., 2013] или вообще отсутствует, если исходить из принятых в мире стандартов и критериев [Медведева, 2009]. Широкое внедрение органического земледелия в России тормозится отсутствием строгой законодательно-нормативной базы и недостаточной теоретической и технологической подготовленностью производителей органической продукции [Григорьян и др., 2013]. Считается, что в стране существует около 200 фермерских хозяйств, производящих органические продукты, которые сертифицируются западными фирмами [Медведева, 2009]. По данным международных организаций [The World of Organic Agriculture...2013] к концу 2011 года в России площадь органических сельскохозяйственных земель насчитывала 126.8 тыс. га, что составляет 0.16% от всей посевной площади в стране. Тем не менее, органическое земледелие в России является перспективным направлением аграрного производства, хорошо согласуясь с задачей биологизация и экологизация земледелия как стратегического направления в обеспечении продовольственной безопасности [Державин,

2010] и имея востребованность на внутрироссийском и международном рынке исходя из положительной динамики роста продаж органической продукции [Медведева, 2009].

1.2. СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ОРГАНИЧЕСКОЙ И ТРАДИЦИОННОЙ СИСТЕМ ЗЕМЛЕДЕЛИЯ НА УРОЖАЙ КУЛЬТУР, АГРОХИМИЧЕСКИЕ И БИОЛОГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПОЧВЫ

При сравнительном исследовании традиционного и органического земледелия необходимо представлять совокупный эффект, а не отдельные различия, в том числе в методах управления. Органическое сельское хозяйство – это система, которая максимально тесно связана с экологией и с природными процессами. Животноводство и растениеводство в органической системе более тесно интегрированы друг с другом, чем в традиционных системах [Watson et al, 2008]. Поэтому при сравнении органической и традиционной системы хозяйствования необходим системный анализ, включающий как экономические, так и экологические критерии [Lampkin, 1994]. Большое значение отводится выбору конкретных критериев. Например, результаты сравнения систем земледелия могут отличаться, если за основу брать такие показатели, как затраты энергии на единицу произведенной продукции или на единицу посевной площади. Разработано много моделей для оценки экономических, экологических и технических аспектов перехода от традиционного производства к органическому сельскому хозяйству и их эффективности [Acs et al. 2005]. Эффективность разных систем земледелия сравнивается по продуктивности, качеству продукции, степени использования или удельной доли биологического азота в его балансе конкретного агроценоза, применению (недопущению применения) минеральных удобрений, пестицидов, химических средств защиты растений [Минеев и др., 1993]. Дополнительным параметром является степень противоэрозионной защиты, обеспечиваемая технологией обработки почвы [Cardelly et al, 2004]. В ряде работ важным

диагностическим показателем, определяющим эффективность применения традиционной или органической системы относят изменения содержания и качества почвенного органического вещества (ПОВ), доли микробной биомассы в составе ПОВ, активности почвенного микробного сообщества, биоразнообразия, эмиссии парниковых газов [Condron, 2000].

1.2.1. ВЛИЯНИЕ ОРГАНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ПРИМЕНЕНИЯ УДОБРЕНИЯ НА УРОЖАЙ И КАЧЕСТВО ПРОДУКЦИИ

Основная цель сельскохозяйственного производства – обеспечение растущего населения высококачественной продукцией. Поэтому используемая система земледелия должна быть высокопродуктивной, а производимая продукция – качественной, обладая питательной ценностью, и безопасной для здоровья человека и животных.

По влиянию на среднюю продуктивность севооборота на тяжелосуглинистой дерново-подзолистой почве органическая система (ежегодно по 9-15 т/га с 1931 по 2006 гг.) и минеральная (эквивалентные органическому удобрению дозы) система удобрений были практически равноценными [Кончиц и др., 2010, Литвинский и др., 2010]. В кормовом севообороте на дерново-подзолистой тяжелосуглинистой почве применение органической системы удобрений повышало сбор кормовых единиц в 1.7 раза по сравнению с контролем, а минеральной и органо-минеральной – в 2 раза [Мерзлая и др., 2011]. Последствие органической системы было слабее действия в 2 раза, тогда как органо-минеральной и минеральной систем – в 4 и 5 раз соответственно [Мерзлая и др., 2011]. Содержание магния и сырого протеина было близким к оптимальному при минеральной и органо-минеральной системе, тогда как при органической системе оно было ниже, но продукция кукурузы не содержала опасных концентраций нитратов. Отмечено, что если условия для минерализации органических удобрений в почве благоприятны, то по содержанию белка и других питательных веществ «органическая» продукция не уступает продукции, выращенной с

минеральными удобрениями [Минеев и др., 1993]. Применение повышенных доз органических удобрений может привести к накоплению избыточного азота и нарушению баланса биогенных элементов в почве, создавая предпосылки накопления нитратов и тяжелых металлов в урожае [Минеев, Ремпе, 1991; Минеев и др., 1993].

В многолетнем опыте в Германии с пшеницей в севообороте с многолетними травами в течение 21 года сравнивались две органические системы (биодинамическая и биоорганическая) и две традиционные (органоминеральная с применением навоза КРС и минеральная с использованием только минеральных удобрений) [Mäder et al, 2007]. Было показано, что при органической системе урожайность пшеницы была на 14% меньше по сравнению с традиционной системой. При полностью минеральной системе с интенсивным использованием фунгицидов высокоурожайные сорта пшеницы были менее подверженные полеганию по сравнению с органическими системами. Содержание микотоксинов в зерне пшеницы было низким при всех системах возделывания сельскохозяйственных культур, в том числе и при органической, при которой фунгициды не использовались. Система удобрения не отражалась на хлебопекарных качествах, но содержание протеина в зернах пшеницы при органической системе было достоверно ниже. Однако при изучении пищевой предпочтительности оказалось, что крысы, кролики и куры предпочитали пшеницу, выращенную на «органических» участках, что говорит о лучшем качестве продукции.

В проведенном в Швеции опыте урожай возделываемых зерновых культур в двух разновидностях органической системы (с «зеленым» удобрением или с навозом КРС) оказался на 15-50% ниже, чем при традиционной системе с минеральными удобрениями, главным образом из-за меньшей эффективности использования растениями азота, а не фосфора или калия [Aronsson et al, 2007].

Обобщение данных опыта в штате Южная Каролина (США) показало, что урожайность зерна кукурузы при применении синтетических удобрений

была выше примерно на 20%, а свежей биомассы – на 42% по сравнению с органической системой [Dufault et al, 2008]. По данным 18-летнего опыта в Швеции урожайность культур в севообороте (клевер, озимая пшеница, картофель, горох, сахарная свекла, бобовые) при органической системе была в среднем на 50% ниже, чем при традиционной, а биомасса сорняков – выше [Kirchmann et al, 2007].

При оценке продуктивности сои, кукурузы и пшеницы не было получено однозначного вывода о преимуществе традиционной или органической системы в зависимости от технологии обработки почвы [Cavigelli et al, 2008]. Урожай кукурузы на всех органических участках был ниже на 24-41% по сравнению с минеральной в сочетании с минимальной обработкой почвы. Многофакторный регрессионный анализ показал, что снижение урожайности кукурузы при органической системе на 70-75% связано с понижением доступности азота и на 21-25% с увеличением засоренности посевов. Показатели урожайности сои были выше при применении минеральной системы на 19%, что было вызвано меньшей засоренностью, а продуктивность пшеницы была примерно одинаковой при обеих сравниваемых системах. Для повышения продуктивности культур, возделываемых по органической системе, рекомендовано применение биологических средств борьбы с сорняками, использование севооборотов с бобовыми культурами и увеличение в них фитоценологического биоразнообразия.

В целом, данные о преимуществах традиционной или органической системы земледелия противоречивы: по ряду показателей отмечается преимущество традиционной системы, а по другим – органической. Результаты обобщения длительных полевых опытов показали отсутствие существенных различий в урожае сельскохозяйственных культур при применении органических или минеральных удобрений [Edmeades, 2003]. В то же время допускается, что снижение урожайности культур в среднем на 10-15% при органической системе относительно традиционной системы

обычно компенсируется уменьшением затрат на производство продукции и улучшением ее качества [Lotter, 2003].

С точки зрения продуктивности агроценозов органо-минеральная система удобрения более эффективна, чем органическая [Минеев и др., 1993; Мерзлая и др., 2012; Наумова и др., 2012; Лапа и др., 2009]. Внесение 3-х кратной дозы навоза (9.6 т/га севооборотной площади) позволило получить 34 ц к.е./га, что достоверно превысило урожай на контроле, но исходя из среднегодовой продуктивности севооборота уступало минеральной и органо-минеральной системам на 17 и 11% соответственно [Мерзлая и др., 2011; Мерзлая и др., 2012]. В зернотравянопропашном севообороте в 23-летнем опыте на дерново-подзолистой легкосуглинистой почве наибольшей эффективностью отличалась органо-минеральная система удобрений при ежегодном внесении N54P54K54 и 6.6 т/га навоза [Мерзлая и др., 2006]. По среднегодовой продуктивности эффективность органической системы удобрения была ниже, чем органо-минеральной и минеральной: прибавка урожай по отношению к контролю составляла 20, 34 и 38% соответственно. По обобщенным материалам 42 опытов, длительностью от 6 до 17 лет, следует, что применение минеральных и органических удобрений привело к значительному повышению продуктивности севооборотов, при этом различия между системами удобрения (органическая, минеральная, органо-минеральная) были не значительными [Минеев и др., 1993]. В исследованиях при сравнении агроэнергетического потенциала пастбищных агрофитоценозов на дерново-подзолистой суглинистой почве отмечено увеличение этого показателя с 975 гДж/га на неудобренном контроле до 1100-1140 и 1140 гДж/га при органической (навоз 10-20 т/га) и органо-минеральной системе [Кулаков и др., 2012].

Поэтому совместное применение в севообороте минеральных и органических удобрений оказывается выгодным с точки зрения улучшения свойств почвы, повышения урожайности культур, экономии удобрений и

снижения рисков экологических нарушений [Петрова, 1965, Лыков, 1982, Мерзлая и др. 2011, 2012].

1.2.2. АГРОХИМИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ И БАЛАНС ПИТАТЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ПРИ РАЗНЫХ СИСТЕМАХ ЗЕМЛЕДЕЛИЯ

Сравнение альтернативных (биодинамическая и биоорганическая) и традиционных (органо-минеральная и минеральная) систем земледелия в условиях длительного эксперимента показало, что после двух ротаций севооборота с биодинамической системой pH почвы увеличился по сравнению с традиционной системой, а после третьей ротации pH почвы с внесением минеральных удобрений снизился на 0.33 ед [Fließbach et al, 2007; Mäder et al, 2007]. В опытах с томатами применение минеральной системы привело к увеличению кислотности почвы, что было вызвано использованием физиологически кислых синтетических удобрений, и повышению содержания фосфора, а при органической системе имела нейтральный pH, характеризовалась средней обеспеченностью азотом и органическим углеродом [Drinkwater et al, 1995]. Увеличение доли бобовых культур в варианте с органической системой участка сделало почву более восприимчивой к подкислению [Kirchmann et al, 2007]. В 22-х летнем полевом опыте на темно-серой лесной почве выявлено четкое положительное влияние навоза на снижение кислотности в пахотном слое [Нечаев и др., 2013]. Применение минеральных удобрений без внесения извести и навоза усиливало кислотность почвенной среды. И органические и минеральные удобрения повышали содержание доступных форм азота, фосфора и калия в почве. В опытах на типичном черноземе было так же показано увеличение кислотности почвы с минеральной системой удобрения, особенно при минимальной обработке по сравнению со вспашкой, а при двойных дозах кислотность почвы в пахотном слое возросла в 1.7 раза, а в подпахотном – в 2.7 раза [Уваров, Карабутов, 2012]. Применение органической системы

удобрения с внесением 40 т/га навоза снижало кислотность почвы пахотного слоя в 1.2 раза, а подкисление почвы на глубине 30-50 см было не столь значительным, как в вариантах с минеральными удобрениями. Минимальные изменения реакции почвенной среды наблюдались при длительном внесении двойного количества навоза или при использовании органо-минеральной системы. Обобщение результатов полевых опытов продолжительностью от 20 до 120 лет показало, что длительное применение органических удобрений приводит к накоплению ПОВ, и как следствие, к улучшению физических и водно-физических свойств почв [Edmeades, 2003].

В длительном опыте в Швеции определено влияние традиционной и двух органических системах земледелия (с использованием «зеленого» удобрения и с внесением навоза) на размеры вымывания азота, фосфора и калия из почвы и состояние баланса этих элементов при возделывании зерновых культур [Aronsson et al, 2007]. Показано, что вымывание азота из почвы было примерно одинаковым для всех сравниваемых вариантов, тогда как фосфора больше всего вымывалось в варианте с зеленым удобрением. Все сравниваемые системы обеспечивали положительный баланс азота и отрицательный баланс калия, а наиболее существенные различия между системами были по балансу фосфора: его дефицит при органической системе был отчетливее, чем при традиционной системе (табл. 2).

По результатам 18 летнего опыта в Швеции было отмечено, что применение томас-шлака и апатита в варианте с органической системе давало более существенное повышение содержания в почве экстрагируемого фосфора, чем при применении фосфорных удобрений в традиционной системе [Kirchmann et al, 2007]. Применение покровных культур в севообороте с органической системой привело к небольшому уменьшению вымывания азота. Агрономическая эффективность азота и эффективность использования растениями фосфора при органической системе оказались ниже, чем при традиционной системе, составив 9-10 и 16-18 кг зерна на кг N и 7 и 36% от внесенного соответственно [Kirchmann et al 2007].

Таблица 2. Баланс азота, фосфора и калия при разных системах возделывания зерновых культур

Статья баланса	Органическая с «зеленым» удобрением			Органическая с навозом КРС			Традиционная с минеральными удобрениями		
	N	P	K	N	P	K	N	P	K
Приход всего	84	-	-	154	7.3	39	134	20	-
Минеральные удобрения	-	-	-	-	-	-	134	20	-
Навоз	-	-	-	49	7.3	39	-	-	-
Фиксация азота	84	-	-	105	-	-	-	-	-
Расход всего	56	7.0	15	115	15	102	104	20	32
Урожай	45	6.2	9.3	108	15	92	91	20	24
Вымывание	11	0.8	5.2	7.4	0.4	9.5	13	0.4	8.3
Баланс	28	- 7.0	- 15	39	- 8.1	-63	30	- 0.4	- 32

В Англии по результатам 15-и летнего полевого опыта было обнаружено более низкое содержание в почве подвижных форм фосфора и калия, чем при традиционной системе земледелия, особенно в старопахотных почвах с органической системой, тогда как по содержанию $C_{орг}$, $N_{общ}$ и соотношению C:N существенных различий между сравниваемыми системами земледелия не было Gosling , Shepherd, 2005].

Системы применения удобрений за 20 лет полевого опыта по-разному влияли на содержание основных питательных элементов в типичном черноземе [Уваров, Карабутов, 2012]. Содержание щелочнорастворимого азота увеличивалось в наибольшей степени при органо-минеральной системе, чем при отдельном применении минеральных или органических удобрений. Минеральная система способствовала повышению содержания этой формы азота, а органическая – удерживала на исходном уровне или повышала, в зависимости от дозы, не имея преимущества перед минеральной системой. Содержание подвижного фосфора увеличивалось и при минеральной и при органической системе независимо от дозы навоза, но под действием двойных

доз минеральных удобрений содержание этой формы элемента возрастало до высокого и очень высокого уровня. Влияние систем удобрения на содержание подвижного калия было аналогичным: наибольший эффект проявлялся при органо-минеральной системе [Наумова и др., 2012]. Органическая и минеральная системы способствовали повышению обеспеченности дерново-подзолистой почв азотом, фосфором и калием, но длительное применение минеральных удобрений увеличивало содержание N-NO_3^- в 4.7 раза по сравнению с контролем, а органических удобрений – в 2.7 раза.

1.2.3. ВЛИЯНИЕ СИСТЕМ УДОБРЕНИЯ НА БИОЛОГИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ПОЧВЫ И БИОРАЗНООБРАЗИЕ

Химические и биологические параметры отображают разные свойства почвы и признаки их изменения под действием природных и агротехнических факторов. Биологические (микробные) параметры – более чувствительны и адекватны к изменениям качества почвы, вызываемым разными системами сельскохозяйственного производства, чем химические показатели [Bending et al, 2004]. В исследованиях этих авторов химические параметры качества почвы (легкая фракция ПОВ, подвижный N, водорастворимые углеводы) не давали четкой разницы между органической и традиционной системой, тогда как микробный анализ (N микробной биомассы, базальное дыхание, АТФ) показывал различия в размерах, структуре и функционировании микробных сообществ. Было отмечено, что добавление ОВ с сидератами приводило к изменению метаболических профилей при обеих системах земледелия, но разнообразие профилей увеличивалось при органической системе.

При сравнении биодинамической, минеральной и органо-минеральной систем самые высокие показатели содержания углерода микробной биомассы (С_{мб}) и активности микроорганизмов были свойственны почве органических систем [Fließbach et al, 2007, Mäder et al, 2007]. В других исследованиях разные системы земледелия оказывали характерное влияние на динамику

биологических свойств почвы [Агацjo, 2008]. Применение органической системы приводило к изменению в микробных сообществах, увеличению микробиологической активности и к увеличению содержания $C_{орг}$ в долгосрочной перспективе по сравнению с минеральной системой. Базальное дыхание, и минерализация органического вещества оказались выше при применении органической системы, в то время как дыхательный коэффициент qCO_2 был выше в почве с минеральной системой, показывая неблагоприятные экофизиологические условия для почвенных микроорганизмов. Постоянное поступление разлагаемого органического вещества в почву с органической системой стимулировало деятельность гетеротрофных микроорганизмов. Содержание $C_{мб}$ в почве органических участков было на 45-64% выше, чем с минеральной системой.

В песчаной почве полевого опыта и в серой лесной почве мелкоделяночного опыта с органическим удобрением содержалось 1.4-2.1 и в 1.0-1.2 раза больше глюкозоподобного (с эквивалентной глюкозе скоростью окисления) и солерастворимого органического углерода, чем при минеральной системе [Ходжаева и др., 2010]. Внесение навоза в песчаную почву и растительных остатков в серую лесную почву способствовало при этом быстрому увеличению содержания глюкозоподобного углерода в этих почвах.

При возделывании овощных культур значения метаболического потенциала (дегидрогеназа/водорастворимый $C_{орг}$) и биологического индекса плодородия (дегидрогеназа + k каталаза/2) почвы были достоверно выше при органической системе, указывая на более существенную активность утилизации субстратов по сравнению с минеральной [Cardelli et al, 2004]. А более высокие показатели коэффициента гидролиза (отношение концентраций флуоресцеина после и до гидролиза диацетата) свидетельствовали о более высокой гидролизующей способности почв с органической системой.

Увеличение содержания Смб было установлено в разных опытах и на разных почвах как при редком, так и при длительном внесении навоза с минеральными удобрениями, что объяснялось как повышением количества субстрата для микроорганизмов, так и улучшением физических свойств почвы, что благоприятно сказывалось на развитии почвенных микроорганизмов [Наумова и др., 2012]. Длительное внесение бесподстилочного навоза положительно влияло на биологические свойства дерново-подзолистой почвы, способствуя увеличению содержания доступного микроорганизмам углерода в 3.6-4.4 раза, количество которого достигло около 19% от $C_{орг}$, при этом увеличение дозы навоза не сопровождалось эквивалентным увеличением этого пула углерода [Орлова и др., 2006].

В агроэкосистемах с органическим земледелием по сравнению с традиционными выше численность жужелиц, биомасса дождевых червей больше на 30-40%, их плотность на единицу площади – на 50-80%, численность стафилинов (оротконадкрылые жуки) – на 60-70%, пауков – на 70-120%, общая биомасса почвенных микроорганизмов – на 20-40% [Organic Farming Enhances..., 2000]. В исследованиях, выполненных в Дании, обнаружено повышенное обогащение грибами *Penicillium spp.* и *Gliocladium roseum* почв с органической системой, в отличие от традиционной системы с использованием минеральных удобрений, не зависимо от различий по свойствам почв ($C_{орг}$, $N_{общ}$, подвижный P, насыщенность основаниями, плотность почвы) [Elmholt, Labouriau, 2005]. Наоборот, вид *Trichoderma spp.* доминировал в почвах с внесением минеральных удобрений, хотя в литературе, как отмечено авторами, имеются сведения о преобладании этого вида грибов в почве с органической системой.

При изучении биологических параметров почвенной экосистемы в условиях различных систем земледелия биомасса грибов в разные сезоны увеличивалась в следующей последовательности: традиционное земледелие < конверсионный период < биологическое земледелие < целина [Григорьян и

др., 2011]. Максимальная плотность почвенной мезофауны и наибольшее число таксономических групп беспозвоночных животных выявлено на полях под многолетними травами и зерновыми культурами при контурно-мелиоративной организации агроландшафта в условиях биологической системы земледелия. Подобные выводы получены в отношении свободноживущих азотфиксирующих микроорганизмов (*Azotobacter*) и почвенного дыхания, как интегрального показателя.

Считается, что почвенная система с нормальным обеспечением питательными веществами более стабильна, чем при их дефиците или избытке. Поэтому биодинамическая система, в которой за счет «зеленого» удобрения питательные вещества возмещаются не полностью, была менее стабильной по сравнению с биоорганической с внесением навоза или с минеральной [Condrón et al, 2000]. Наоборот, в других работах на основании сравнения химических и биологических параметров сельскохозяйственных угодий, культивируемых по органической и минеральной системе, пришли к выводу, что органические почвы – более стабильны [Diepeningen et al, 2006]. По сравнению с минеральной системой, почвы органического земледелия характеризовались высоким биоразнообразием (содержание нематод, нитчатых грибов, дрожжей и эубактерий), повышенной биологической активностью, но низким содержанием нитратов в почве, чем почвы минеральной системой

1.3. СОДЕРЖАНИЕ И КАЧЕСТВО ОРГАНИЧЕСКОГО ВЕЩЕСТВА В ПОЧВЕ ПРИ РАЗНЫХ СИСТЕМАХ ЗЕМЛЕДЕЛИЯ

Под почвенным органическим веществом (ПОВ) понимается многокомпонентный континуум частично и полностью разложившихся остатков биоты, микробной биомассы, экскреций, биомолекул и гуминовых веществ, располагающихся в конгломерате минеральных частиц, со временем существования от нескольких часов и суток до тысячелетий [Семенов, Тулина, 2011]. Доминирующей по массе частью ПОВ является

гумус – смесь исходно прочных, (био)химически измененных и стабилизированных органических материалов с идентифицируемой и неидентифицируемой структурой. Присутствие ОВ в почве придает ей уникальность свойств и режимов, обеспечивает многообразие выполняемых общебиосферных и биогеоценотических функций, в том числе агрономических [Ганжара, 1998; Добровольский, Никитин, 1990]. Содержание $C_{орг}$, азота и фосфора в составе ПОВ, наряду с численностью микроорганизмов, реакцией почвенной среды, емкостью катионного обмена и структурно-агрегатным составом, является одним из основных показателей здоровья и качества почвы [Karlen et al, 2003]. Увеличение содержания органического вещества способствует улучшению пищевого, воздушного, гидротермического режимов почвы, что благоприятно сказывается на легкости ее обработки в оптимальные для посева культур сроки.

Современное содержание ОВ в почве зависит от большого числа факторов, среди которых условия климата, структура ландшафта, тип растительного покрова, характер землепользования, особенности физико-химических и биологических свойств почвы относятся к числу наиболее важных [Тюрин, 1937; Кононова, 1963; Александрова, 1980, Орлов и др., 2004].

1.3.1. УРОВНИ СОДЕРЖАНИЯ ОРГАНИЧЕСКОГО ВЕЩЕСТВА В ПОЧВЕ

В природных экосистемах поддерживается равновесное состояние между поступлением и потерями ОВ, поэтому содержание и запасы ПОВ могут оставаться практически неизменными неопределенно долгое время. При введении целинных почв в культуру сопровождается на начальном этапе большими минерализационными потерями дестабилизированного ОВ и резким снижением содержания органического углерода ($C_{орг}$) в течение нескольких лет, поскольку поступающего в условиях пашни количества растительных остатков недостаточно для поддержания его уровня,

свойственного целине (рис. 1). Со временем процесс дегумусирования замедляется, и почва при постоянном способе использования переходит в новое квазистационарное состояние, когда уровень ОВ находится в относительном равновесии со сложившимися агроэкологическими условиями [Кирюшин и др., 1993]. Квазистационарное состояние в содержании $C_{орг}$ в почве при смене элементов агротехнологий или землепользования может быть достигнуто через десятки лет [Когут и др., 2011].

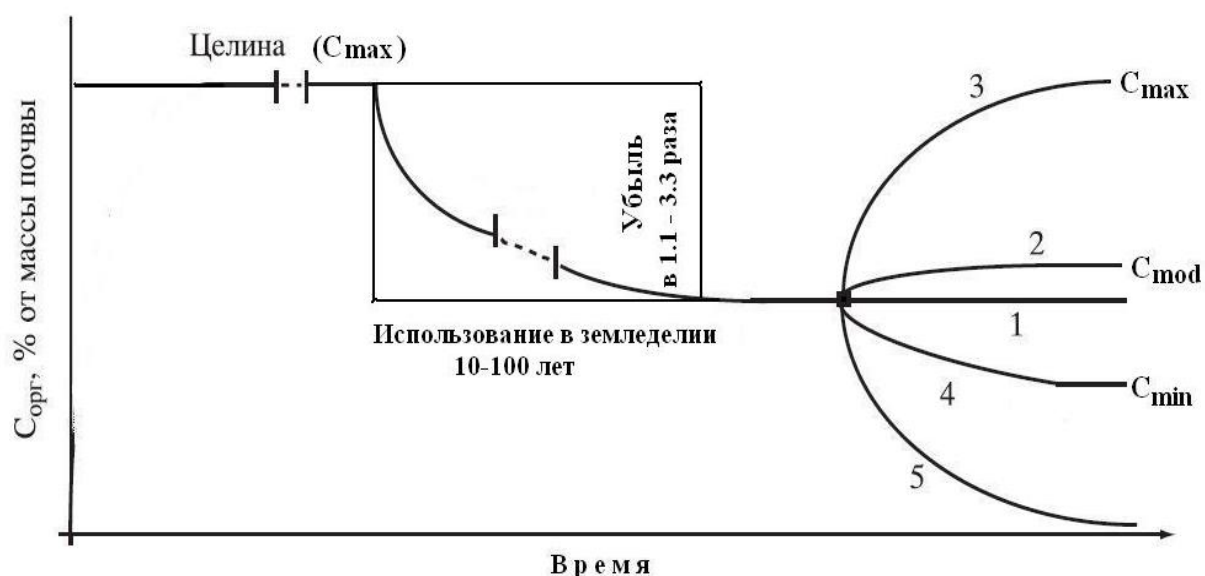


Рис. 2. Схема возможных изменений содержания $C_{орг}$ в почве [Когут и др., 2011; Шарков, 2011].

1 — равновесное состояние без применения удобрений, 2 — при применении оптимальных доз минеральных и органических удобрений (модальный уровень), 3 — при применении мелиоративных доз навоза или торфа или переводе почвы в залежь (максимальный уровень), 4 — при бессменном чистом паровании почвы (минимальный уровень), 5 — при прогрессирующей эрозии почвы

Так в тяжелосуглинистой дерново-подзолистой почве удобренного варианта равновесное состояние в содержании $C_{орг}$ устанавливалось через 30 лет, в течение которых происходила убыль ПОВ [Кончиц и др., 2010]. Уровень равновесного содержания $C_{орг}$ в почве существенно зависит от доли паров, пропашных и зерновых культур, многолетних трав и количества

механических обработок в системах земледелия [Когут и др., 2011; Шарков, 2011]. Например, если велика доля чистых паров и пропашных культур в севообороте, то равновесный уровень содержания гумуса будет значительно меньше, чем таковой в почвах севооборотов, насыщенных зерновыми культурами или травами.

В почве агроценозов, как правило, содержится меньше $C_{орг}$, чем в почве того же типа естественных угодий [Орлов, Бирюкова, 1995; Орлов и др., 1996; Schnitzer et al, 2006]. Значительной агрогенной деградации подвержены черноземные почвы, в которых ежегодно теряется до 0.23-1.74 т/га органического углерода [Сорокина, Когут, 1997; Щербаков, Надежкин, 2000; Орлов и др., 1996]. По результатам агроэкологического мониторинга оказалось, что содержание $C_{орг}$ во всех пахотных подтипах серых лесных почв меньше, чем в горизонте A_1 аналогичных целинных почв: в светло-серых – в 2.7 раза, в серых и темно-серых – в 1.5 и 1.2 раза соответственно [Полякова, 2008]. Длительное сельскохозяйственное использование черноземных почв Канады в течение 31-94 лет привело к снижению содержания $C_{орг}$ в пахотном горизонте в 1.9-3.3 раза по сравнению с неиспользуемыми в земледелии почвами и к значительному повышению доли ароматических компонентов в составе ПОВ [Schnitzer et al, 2006]. Особенно велика разница по содержанию и запасам ПОВ между необрабатываемыми и обрабатываемыми почвами в эрозионных ландшафтах.

Выделяют три основных уровня содержания ОВ в почве: минимальное, модальное и максимальное [Когут и др., 2011]. Минимальным содержанием ОВ характеризуется почва в условиях длительного бессменного чистого пара, когда растительные остатки и органические удобрения не поступают в почву, а агротехнические обработки производятся постоянно. Модальное содержание ОВ – это наиболее распространенный его уровень в почве конкретной почвенно-климатической зоны (района) определенного гранулометрического состава с типичной агроэкосистемой. Модальное содержание $C_{орг}$ в почве достигается использованием агротехнических

мероприятий, применяемых с целью повышения урожайности культур. По обобщенным данным оптимальные дозы удобрений, минимизация механической обработки почвы, уменьшение доли чистого пара в севооборотах обеспечивали увеличение содержания $C_{орг}$ в выщелоченном черноземе на 0.1-0.2%, а ежегодное внесение соломы в дозах 3.0-9.0 т/га – на 0.1-0.3% [Шарков, 2011].

Максимальное содержание ОВ устанавливается в почве в естественных условиях, когда растительная масса не отчуждается, как это свойственно целине или длительной залежи. Максимальный уровень содержания $C_{орг}$ в пахотных почвах, близкий к целинному, можно достичь ежегодным внесением мелиоративных доз навоза и торфа, либо переводом этих почв в залежь [Шарков, Данилова, 2010]. Например, высококультуренные (огородные) серые лесные почвы с длительным и практически ежегодным внесением навоза в дозах до 30-40 т/га выделяются повышенным содержанием $C_{орг}$ не только среди пахотных почв (в 2-3.5 раза), но и по сравнению с целинными аналогами (в 1.3-1.5 раза) [Полякова, 2008].

При длительном поступлении органических материалов в почву происходит экспоненциальное накопление $C_{орг}$ до уровня, соответствующему новому стационарному состоянию (рис. 2).

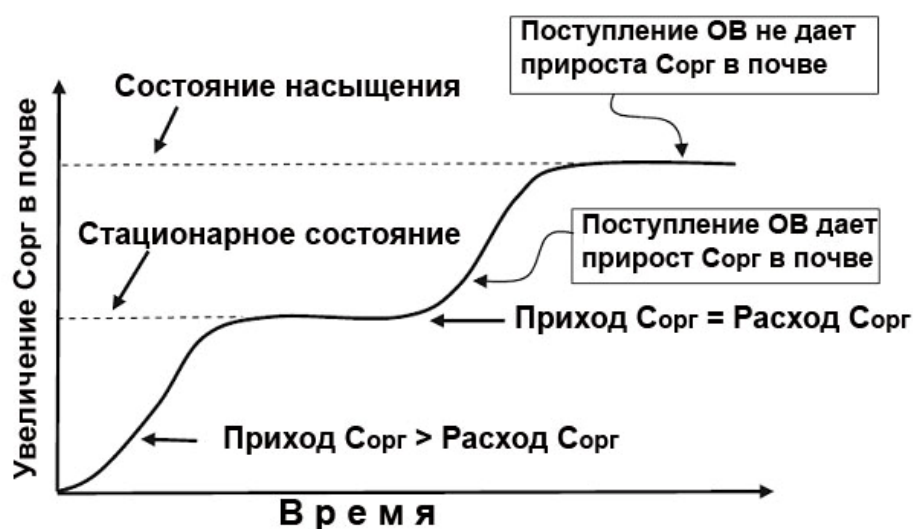


Рис. 3. Возможные сценарии аккумуляции ОВ в почве [West, Six, 2007]

Дальнейшее увеличение его содержания ведет к полному насыщению почвы $C_{орг}$, избыток которого теряется из почвы. В этом случае поступление ОБ не дает прироста $C_{орг}$ в почве. Пределы аккумуляции $C_{орг}$ в почве зависят от ее способности стабилизировать ОБ. Чем больше в почве содержится глинистой гранулометрической фракции (<53-20 мкм) и выше скорость образования агрегатов, тем выше порог насыщения почвы ОБ [Six et al, 2002].

С целью определения потребности в оптимизации или в воспроизводстве запасов ОБ в почве введено понятие критического уровня его содержания, под которым подразумевается минимальное содержание $C_{орг}$ в пахотном слое почвы, ниже которого происходит снижение урожайности культур, несмотря на достаточное применение минеральных удобрений [Шарков, 2011]. В других исследованиях используется понятие порогового содержания $C_{орг}$ в почве [Loveland, Webb, 2003]. Если содержание $C_{орг}$ ниже порогового уровня, его недостаток лимитирует продуктивность культур, появляются признаки деградации и ухудшения качества почвы с характерными изменениями ее свойств и нарушением биогеоценотических функций. В почве с содержанием $C_{орг}$ выше порогового уровня его дальнейшее накопление не дает соответствующего прироста урожая, наступает быстрое насыщение почвы $C_{орг}$, избыток которого теряется из почвы. Каждому типу почвы свойственен свой критический (пороговый) уровень содержания ПОВ.

По содержанию $C_{орг}$ (в % от массы) почвы России подразделяются на слабогумусированные <1.74, малогумусированные 1.74–2.90, среднегумусированные 2.90–4.06, многогумусированные 4.06–5.22 и тучные >5.22 [Когут, 2012]. В последствие было предложено установить более детальные градации содержания $C_{орг}$, на основании которых выделялись очень слабо гумусированные <0.29, слабо гумусированные 0.29–0.58, мало гумусированные 0.87–1.74, средне гумусированные 1.74–2.90, сильно гумусированные 2.90–4.64 и тучные >4.64. В соответствии с предложенной

системой “Дополнительных показателей гумусного состояния почв и их генетических горизонтов” [Орлов и др., 2004] содержание $C_{\text{орг}}$ (% от массы почвы) в генетических горизонтах почвенного профиля считается сверхвысоким >11.6 , очень высоким $6.96-11.6$, высоким $4.64-6.96$, средним $3.48-4.64$, ниже среднего $2.32-3.48$, низким $1.16-2.32$, малым $0.58-1.16$ и очень малым <0.58 . Однако единая градация для всех типов почв имеет известные ограничения, не учитывая разнообразие природных условий и сопутствующих факторов. В новой градации пахотных почв по степени гумусированности с учетом их гранулометрического состава и природно-климатической зоны их залегания, выделены следующие классы: меньше минимального, слабогумусированный, среднегумусированный и сильногумусированный [Когут, 2012]. Первый класс включает почвы, частично утратившие инертную компоненту гумуса в результате эрозионного выноса почвенных частиц, перемешивания гумусового горизонта с нижележащими слоями, механического выноса тонкодисперсных частиц при уборке пропашных культур и т.д. Второй и третий классы включают почвы, в той или иной степени, утратившие трансформируемое органическое вещество по отношению к его содержанию в целине в результате биологической минерализации. Четвертый класс включает пахотные почвы, близкие по содержанию гумуса к целинным. Почвы, относящиеся к первому классу, нуждаются в проведении противозерозионных мероприятий или выведении их из сельскохозяйственного оборота. Пахотные почвы второго и третьего классов в отличие от почв четвертого класса испытывают потребность в органических удобрениях.

1.3.2. СОДЕРЖАНИЕ И КАЧЕСТВО ОРГАНИЧЕСКОГО ВЕЩЕСТВА ПОЧВЫ В РАЗНОУДОБРЕННЫХ АГРОЦЕНОЗАХ

Потенциальное плодородие почвы в большей мере зависит от общего запаса органического вещества (ОВ), а эффективное плодородие – от количества лабильного (подвижного, легкоразлагаемого, активного) ОВ, в

котором сосредоточен основной резерв азота и в значительной степени фосфора, необходимых для питания растений (Ганжара, 1998; Шарков, 2011). Агрогенные факторы, к которым относятся системы землепользования, севообороты, дозы удобрений, так же как и природные факторы, приводят к существенным изменениям динамики количественных и качественных показателей плодородия почвы (Литвиновский и др., 2010), влияют на соотношение относительно лабильных и стабильных компонентов ПОВ (Кончиц, 2010). Разные агротехнические факторы по влиянию на баланс ОВ образуют следующий возрастающий ряд: минеральные удобрения < органические удобрения < доля многолетних трав в структуре севооборота [Романенков и др., 2009]. Во многих исследованиях обнаружено устойчивое снижение содержания $C_{орг}$ в почве удобренных агроценозов по сравнению с исходным уровнем [Мерзлая и др., 2012; Наумова и др., 2012; Уваров, Карабутов, 2012]. Действие минеральных удобрений на ПОВ проявляется косвенно посредством изменения биомассы возделываемых культур, физико-химических свойства почв, численности, структуры и активности почвенных микроорганизмов [Шевцова, 2009]. Органические удобрения оказывают как косвенное влияние на ПОВ подобно минеральным удобрениям, так и прямое – обогащая почву органическим материалом и микробной биомассой с широким спектром биоразнообразия.

Обобщение результатов экспериментов продолжительностью от 2 до 56 лет, выполненных в 137 разных мест мира, показало, что применение азотных удобрений в 79% случаев способствовало увеличению содержания $C_{орг}$ в почве, в 15% случаев – снижало и в 6% – не изменяло $C_{орг}$ [Alvarez, 2005]. Дополнительное накопление $C_{орг}$ по сравнению с удобренными вариантами составляло 2 т/га на каждую тонну азота удобрений, и было в основном свойственно почвам с исходно низкой обеспеченностью $C_{орг}$. Если надземные растительные остатки удалялись, применяемые дозы удобрений были избыточными для возделываемых растений, либо содержание $C_{орг}$ достигало предельного для данного типа почвы уровня, применение азотных

удобрений не вело к накоплению ОВ в почве [Alvarez, 2005; Christopher, Lal, 2007]. Согласно другим обобщениям систематическое применение минеральных удобрений независимо от типа почвы увеличивает содержание ПОВ в среднем на 0.06-0.08%, органических – на 0.17-0.25%, а совместно минеральных и органических удобрений – на 0.09-0.20% $C_{орг}$ от массы почвы (табл. 3).

Таблица 3. Влияние систем удобрений на содержание органического вещества в пахотном слое почв по результатам длительных полевых опытов [Шарков, Данилова, 2010]

Почва	Вариант	Длительность опытов, лет	Среднегодовые дозы N (кг/га) или навоза (т/га)*	Изменение содержания $C_{орг}$ (абс. %)
Дерново-подзолистые и серые лесные	НПК	12-56	50	+0.06
	Навоз	12-56	10*	+0.25
	Навоз + НПК	6-37	34 + 6*	+0.09
Черноземные	НПК	6-54	45	+0.08
	Навоз	10-54	12*	+0.17
	Навоз + НПК	10-70	40 + 6*	+0.20

* Доза навоза, т/га

Наряду с этим имеется много экспериментальных примеров, указывающих на снижение содержания ОВ в разных почвах под действием минеральных удобрений [Гомонова, Минеев, 2012; Кузьменко, 2010; Мерзлая и др., 2006; Мерзлая и др., 2012; Шевцова и др., 2012]. Убыль ОВ при минеральной системе удобрения наиболее свойственно почвам с высоким исходным уровнем содержания $C_{орг}$ [Шевцова и др., 2012]. В южном черноземе за 36 лет опыта содержание $C_{орг}$ в слое 0-40 см контрольного варианта уменьшилось по сравнению с исходным количеством на 0.29%, а применение минеральных систем удобрения не давало прироста $C_{орг}$, хотя и

уменьшало размеры его потерь на 25-46% по сравнению с контролем [Чуб и др., 2010]. Внесение минеральных удобрений в почву не изменяло содержание ОВ и выщелоченном черноземе Средней Сибири [Ульянова и др., 2010].

Применение органических удобрений в умеренных дозах сдерживает дегумусирование пахотных почв, а в повышенных дозах – способствует стабильному и существенному приросту содержания ОВ [Литвинский и др., 2010; Мерзлая и др., 2010; Минеев и др., 1993; Чеботарев и др., 2009; Уваров, Карабутов, 2012; Edmeades, 2003]. В условиях южного чернозема применение органических удобрений способствовало существенному уменьшению потерь $C_{орг}$ в южном черноземе [Чуб и др., 2007]. Даже однократная заделка навоза в количестве 20 т/га один раз в 6 лет сдерживала потери ОВ в 2-2.5 раза, при этом 1 т/га навоза увеличивала запасы $C_{орг}$ в почве на 0.067 т/га. При использовании органической системы удобрения (вермикомпост и птичий помет в количестве, эквивалентном N52) и органо-минеральной (NP + вермикомпост или птичий помет) обнаруживалась отчетливая тенденция увеличения содержания $C_{орг}$ в черноземе выщелоченном даже через 2 года опыта [Ульянова и др., 2010]. После полных 19 ротаций севооборота содержание $C_{орг}$ в тяжелосуглинистой дерново-подзолистой почве при органической системе удобрения оказалось на уровне исходного до закладки опыта, и было в 2.5 раза выше по сравнению с неудобренным контролем [Кончиц и др., 2010]. При минеральной системе удобрения, по данным этих авторов, содержание $C_{орг}$ оказалось на 0.15-0.18% (13-16 отн. %) ниже, чем при органическом удобрении, но в 2 раза выше, чем на контроле.

Вместе с тем имеются данные, что одностороннее применение органических удобрений не препятствовало дегумусированию дерново-подзолистой легкосуглинистой почвы [Мерзлая и др., 2006]. По данным 18-ти летнего полевого опыта в Швеции содержание $C_{орг}$ в почве снизилось при

применении и минеральной и органической системы, однако, при органической системе – это снижение было меньше [Kirchmann et al, 2007].

В ряде исследований подчеркивался факт более значительного увеличения $C_{орг}$ в почве при органо-минеральной системе удобрений, чем при одностороннем применении минеральных или органических удобрений [Кузьменко, 2010; Мерзлая и др., 2012; Чеботарев и др., 2009; Кузнецов и др., 2007; Лапа и др., 2009; Минакова и др. 2011]. Содержание $C_{орг}$ в пахотном слое выщелоченного чернозема находилось в прямой зависимости от массы поступающего в почву свежего органического вещества: в севообороте с занятым паром при внесении минеральных удобрений на фоне навоза и дефеката оно было на 0.34% больше, чем на контроле [Придворев и др., 2009]. В опыте на серой лесной тяжелосуглинистой почве при одностороннем применении минеральных удобрений содержание $C_{орг}$ повысилось на 0.21%, тогда как при комплексном окультуривании с периодическим внесением органических удобрений – на 0.42% [Ушаков, 2008]. По результатам 60-и летнего полевого опыта в Сибири с органо-минеральной системой удобрения отмечено накопление ОВ в пахотном слое дерново-подзолистой почве под зернотравяным севооборотом в 1.2 раза или на 11.5 т С/га [Наумова и др., 2012]. Было отмечено, что последовательность культур в севообороте оказывала влияние, сравнимое с внесением удобрений, поэтому путем подбора культур в севообороте можно увеличить темпы накопления ПОВ при традиционной или органической системе земледелия. Увеличение гумуса на 0.39% происходило в результате совместного применения органических и минеральных удобрений, особенно в двойных дозах [Уваров, Карабутов, 2012]. Так же подчеркивается роль органо-минеральной системы удобрения, как наиболее действенного фактора в предотвращении потерь подвижных гуминовых и фульвокислот на дерново-подзолистых почвах [Богатырева и др., 2013].

Изменение характера землепользования, использование разных обработки почвы и систем удобрения отражается не только на валовом

количестве ПОВ, но и на его составе и качестве, причем изменения в качестве ПОВ проявляются быстрее и заметнее, чем в его валовом содержании. Качество ПОВ традиционно оценивается по соотношению углерода гуминовых кислот к углероду фульвокислот ($C_{гк}/C_{фк}$) и $C_{гк}$ к $C_{орг}$ (индексы полимеризации и гумификации, соответственно), по содержанию свободных, связанных с кальцием, прочносвязанных фракций $C_{гк}$ и неэкстрагируемого остатка [Александрова, 1980; Орлов и др., 2004]. Классическим является положение о высокой агрономической ценности гуматного типа гумуса по сравнению с фульватным [Александрова, 1980]. Фракционно-групповой состав, определяемый методом Тюрина в модификации Пономаревой и Плотниковой, характеризует генетическую принадлежность почв, взаимодействие специфических гумусовых веществ с минеральными компонентами почвы. Соотношениями фракций $C_{гк1}+фк(1a+1)/C(гк+фк)_{2+3}$, $C_{гк1}/C_{гк(2+3)}$, $C_{гк(1+3)}/C_{гк2}$, $C_{гк1}/C_{фк1}$ и $C_{гк2}/C_{фк2}$ характеризуется подвижность всей системы гумусовых кислот и группы $C_{гк}$, тип фракционного распределения $C_{гк}$, интенсивность образования новых $C_{гк}$ и формирования их подвижных форм, а также интенсивность полимеризации гумусовых структур и формирования гуматов [Овчинникова и др., 2003; Овчинникова, 2012]. Было показано, что при длительном интенсивном применении удобрений уменьшается содержание гуминовых кислот в составе 1-й фракции и увеличивается содержание фульвокислот, а уменьшение соотношения $C_{гк}/C_{фк}$ первой фракции является важным диагностическим показателем деградации почв, ухудшения фракционно-группового состава, снижения уровня плодородия [Овчинникова и др., 2003]. Результаты других исследований подтверждают наличие разнонаправленных изменений фракционно-группового состава ПОВ при применении разных систем удобрения [Гомонова, Минеев, 2012; Карпова и др., 2008; Кузнецов и др., 2007; Завьялова, Кончиц, 2011; Овчинникова, 2012].

Использование органической системы (применение навоза или заплата покровных культур) давало более значительное по сравнению с минеральной системой накопление $C_{орг}$ в почве, причем в варианте с навозом почвенное органическое вещество было более лабильным, а в варианте с запахиваемыми культурами – более стабильным [Wander et al, 1994]. Содержание углерода в химически (гуминовые кислоты и гумин) и физически (легкая и тяжелая фракции) выделенных фракциях органического вещества было значительно выше в почвах с органической системой, чем с традиционной [Wander, Traina, 1996]. В опытах на легкосуглинистых дерново-подзолистых почвах органические удобрения поддерживали уровень содержания гумуса и улучшали качественные показатели органического вещества по сравнению с контролем, а применение минеральной системы удобрения усугубляло неблагоприятные природные свойства гумуса, ухудшая его состав (Шевцова и др., 2012). Суммарное количество трех фракций гуминовых кислот в почве с минеральными удобрениями было значительно меньше, чем при органической или органо-минеральной системе, а содержание фульвокислот было в несколько раз больше. Систематическое применение различных систем удобрения способствовало изменению фракционно-группового состава гумуса дерново-подзолистой легкосуглинистой почвы при сохранении характерных зонально-генетических особенностей [Лапа и др., 2011]. В работе показано, что суммарное содержание $S_{фк}$ достигало 29–39%, преобладая над $S_{гк}$, сумма которых находилась в пределах 20–27%, из-за чего в почве всех опытных вариантов сохранялись свойства гуматно-фульватного типа гумуса. При внесении одних минеральных удобрений серой лесной тяжелосуглинистой почве происходило преимущественное накопление «свободных» $S_{гк}$, тогда как при органо-минеральной системе – увеличивалось содержание прочносвязанных $S_{гк}$ [Ушаков, 2008]. В выщелоченном черноземе под действием длительного применения удобрений в зерносвекловичном севообороте происходило увеличение фракций $S_{гк1}$ и $S_{гк3}$ при

одновременной убыли $C_{гк2}$ в группе $C_{гк}$ и снижения доли $C_{фк1a}$, $C_{фк1}$ и $C_{фк3}$ в группе $C_{фк}$, в результате чего расширялся диапазон соотношения $C_{гк}:C_{фк}$, особенно при внесении $N45P45K45$ + навоз 50 т/га [Минакова и др., 2011]. Изменение фракционно-группового состава гумуса обнаруживалось как в неудобренном, так и в длительно удобрявшемся южном черноземе с характерным уменьшением доли $C_{гк}$ и увеличением $C_{фк}$, что значительно изменило соотношение между фракциями, хотя и в пределах границ свойственных этому типу почвы [Чуб и др., 2010; Чуб и др., 2010]. На выщелоченном черноземе при органо-минеральной системе происходило накопление $C_{гк}$, а при органической с использованием сидерата и навоза – преимущественно $C_{фк}$ [Хабиров, Сергеев, 2008].

В соответствие со сложившимися представлениями, потенциальное плодородие определяется общими запасами ОВ, а эффективное – долей лабильного (подвижного, легкоразлагаемого, активного) ОВ, в котором сосредоточен ближайший резерв необходимых растениям элементов питания (Ганжара, 1998; Шарков, 2011). Поддержание определенного уровня содержания активного ОВ в почве является обязательным условием сохранения и воспроизводства запасов ПОВ [Когут, 2003; Шарков, 2011; Шарков, Данилова, 2010; Романенков и др., 2009]. Подвижным ($C_{подв}$) предложено считать экстрагируемую 0.1 н. NaOH часть ПОВ без декальцинирования почвы, лабильным ($C_{лаб}$) – 0.1 м. раствором $Na_4P_2O_7$ при pH 7.0, а водорастворимым ($C_{вр}$) – извлекаемую водной вытяжкой [Шевцова, 2009]. В составе лабильного органического вещества целесообразно выделять две группы компонентов, существенно различающихся между собой природой и функциями, используя разные методы их экстрагирования из почвы: легкоразлагаемое ОВ и лабильные гумусовые вещества [Мамонтов и др., 2008]. По данным этих авторов разные экстрагенты извлекают разное количество лабильного ОВ (вода < 1 н. NaCl < нейтральный 0.1 М пиррофосфат натрия < щелочной 0.1 М пиррофосфат натрия < 0.1 н. NaOH < 0.2 н. NaOH), при этом с возрастанием растворяющей способности

экстрагентов из почвы наряду с чисто лабильными компонентами, будет больше извлекаться и относительно консервативных компонентов. Например, в 0.1 н. NaOH вытяжке, кроме собственно лабильных, содержатся и стабильные компоненты, относящиеся к Сгк и Сфк, на долю которых может приходиться 50% массы щелочнорастворимого вещества [Ганжара и др., 2005]. Легкоразлагаемым ($C_{лов}$) традиционно обозначается легкая фракция ПОВ, отделяемая с помощью «тяжелой» жидкости (NaJ , KJ , $KJ + CdJ_2$, $3Na_2WO_4 \cdot 9WO_3 \cdot xH_2O$) [Ганжара и др., 1990, Мамонтов и др., 2008, Семенов и др., 2009].

В большинстве цитируемых выше работ подвижную (лабильную, легкоразлагаемую, водорастворимую) фракцию называют активным ОВ. Однако надо иметь в виду, что химические или физические фракции ПОВ во многих случаях характеризуют больше сам метод фракционирования, чем структуру и состояние выделяемых веществ или соединений. Очевидно, что даже при самом селективном фракционировании ПОВ оно не будет идентично той его части, которая используется почвенными микроорганизмами. В исследованиях на дерново-подзолистой супесчаной почве было отмечено низкое содержание доступного микроорганизмам углерода при минеральной системе удобрения, несмотря на значительное содержание подвижной фракции, что дало основание сделать вывод о неравнозначности понятий подвижности и доступности органического вещества [Орлова и др., 2006].

Легко экстрагируемое, подвижное ОВ, может быть не активным из-за недоступности почвенным микроорганизмам в силу наличия физических барьеров, точно также как легко разлагаемое или легко минерализуемое ОВ не всегда является химически лабильным [Семенов и др., 2009]. Поэтому для оценки состояния ПОВ зачастую важнее знать не столько растворимость его компонентов в разных средах, сколько его доступность почвенным микроорганизмам в качестве источника питания и энергии. Активным ПОВ следует считать химически и физически незащищенное ОВ высокого

энергетического и питательного статуса, потенциально минерализуемое микроорганизмами и расходуемое при агрегации, способное к (био)химическим превращениям со временем оборачиваемости от менее 3-х до 10 лет, измеряемое биокинетическим методом по образующемуся $C-CO_2$ [Семенов, Тулина, 2011; Семенов и др., 2006].

На долю подвижного ОВ в легкосуглинистой дерново-подзолистой почве льняного севооборота приходилось 38-47% от $C_{орг}$, при этом в контрольном варианте доля подвижного ОВ была несколько выше, чем в вариантах с использованием минеральной, органической и органо-минеральной системы удобрения [Шевцова и др., 2012]. В неудобренном выщелоченном черноземе на долю $C_{подв}$ приходилось 23% от $C_{орг}$, а внесение вермикомпоста или птичьего помета обогащало почву подвижным ОВ на 100-120 мг/100 г [Ульянова и др., 2010]. Прирост содержания $C_{подв}$ в выщелоченном черноземе от внесения одних минеральных удобрений или совместно с органическими был менее значительным.

Отмечено, что нейтральная пирофосфатная вытяжка не выявляла значимых различий в составе ОВ легкосуглинистой дерново-подзолистой почвы с разными системами применения удобрений [Шевцова и др., 2012]. Количество углерода, извлеченного пирофосфатной вытяжкой, менялось от 24 до 32% от $C_{орг}$ без какой либо взаимосвязи между ними. В опыте с многолетними травами на дерново-подзолистой супесчаной почве применение минеральных удобрений способствовало увеличению в 2 раза $C_{лаб}$, извлекаемого пирофосфатной вытяжкой, тогда как содержание этой фракции в почве с органическим удобрений было таким же как и на контроле [Орлова и др., 2006]. Обнаружено более существенное накопление лабильного ОВ в серой лесной почве при внесении навоза, чем при заделке соломы и сидератов [Карпова и др., 2008]

К легкоразлагаемому ОВ ($C_{лов}$) относят выделенные с помощью плотной («тяжелой») жидкости растительные и животные остатки, поступающие в почву, а также детрит – промежуточные продукты

разложения не связанные с минеральной частью почвы. По химическому составу $C_{\text{лов}}$ представлены лигнином, углеводами, аминокислотами, пептидами и другими неспецифическими соединениями, а также $C_{\text{гк}}$ и $C_{\text{фк}}$. Содержание $C_{\text{лов}}$ в пахотном слое почв характеризуется выраженной сезонной динамикой, связанной с периодами накопления и опада корневой массы, а также с процессами их разложения. Для естественных угодий наиболее высокое содержание $C_{\text{лов}}$ свойственно дерново-подзолистой почве (0.48-1.10%, 21-50% от $C_{\text{орг}}$), наиболее низкое – чернозему обыкновенному и южному (0.14-0.23%, 5-8% от $C_{\text{орг}}$), а промежуточное – серой лесной (0.52%, 20-25% от $C_{\text{орг}}$), каштановой и светло-каштановой почвам (0.30-0.68%, 27-42% от $C_{\text{орг}}$) [Борисов, Ганжара, 2008]. В пахотных почвах зонального ряда, по данным этих авторов, содержится меньше $C_{\text{лов}}$, чем в естественных угодьях: в дерново-подзолистой почве – 0.10-0.17% (10-36% от $C_{\text{орг}}$), в серой лесной – 0.12-0.25% (10% от $C_{\text{орг}}$), в черноземе типичном и выщелоченном – 0.29-0.31% (8% от $C_{\text{орг}}$), в черноземе обыкновенном и южном – 0.11-0.17% (5-7% от $C_{\text{орг}}$), а в каштановых почвах – 0.13-0.21% (15-20% от $C_{\text{орг}}$). Внесение удобрений значительно изменяет запасы лабильной фракции гумуса, содержание которой зависит от генетических свойств почвы и существующих агротехнологий [Ганжара и др., 1990]. В вариантах с систематическим внесением навоза в дозах 9-15 т/га севооборотной площади увеличение $C_{\text{орг}}$ в тяжелосуглинистой дерново-подзолистой почве сопровождалось возрастанием содержания $C_{\text{лов}}$ в 2.4 раза, при минеральной системе удобрений – примерно в 1.7 раза по сравнению с контролем [Литвинский и др., 2010]. При этом было отмечено увеличение доли $C_{\text{лов}}$ в $C_{\text{орг}}$. В выщелоченном черноземе минимальное содержание $C_{\text{лов}}$ находилось в варианте без удобрений: при внесении минеральных удобрений его содержание повышалось на 27%, а при совместном внесении минеральных и органических удобрений – на 36-48% [Придворев и др., 2009]. В опытах на светло-серой лесной почве содержание $C_{\text{лов}}$ в ряду севооборотов зернопаропропашной – зернопропашной – зернотравянопропашной в

возрастало с 0.105 до 0.152, а на черноземе выщелоченном – с 0.322 до 0.447%, с характерным рядом: чистый пар < картофель < горох < яровые зерновые < кукуруза < озимые зерновые < клевер [Ганжара и др., 2010]. В этих исследованиях установлено, что применение удобрений влияет не только на содержание $C_{\text{лов}}$, но и на качество этой фракции ОВ. В опыте на светло-серой почве при внесении органических удобрений в дозе 10 т/га севооборотной площади зернопаропропашного севооборота содержание $C_{\text{лов}}$ возрастало на 41%, при этом отношение C:N в составе легкоразлагаемого ОВ не менялось. При применении минеральных удобрений наблюдался небольшой прирост $C_{\text{лов}}$ и сужение отношения C:N с 23 до 18.

Почвы зонального ряда отличаются по содержанию активного органического вещества (C_0). В выщелоченном черноземе содержалось соответственно в 1.3, 1.5 и 4.3 раза больше C_0 чем в дерново-подзолистой, серой лесной и каштановых почвах [Семенов и др., 2008]. Минерализационная способность ОВ (% C_0 от $C_{\text{орг}}$) уменьшалась в следующем ряду почв: тундровая > дерново-подзолистая > серая лесная > каштановая > темно-каштановая > чернозем выщелоченный. По обобщенным данным, содержание C_0 в почвах естественных угодий варьирует от 65 до 562 мг/100 г, что составляет 1.8-11.7% от $C_{\text{орг}}$ [Семенов, Тулина, 2011]. Используемые в сельскохозяйственном производстве почвы, за исключением отдельных вариантов, содержат в 1.8-2.1 раза меньше активного ОВ, при этом убыль C_0 значительно выше, чем валового $C_{\text{орг}}$. Авторами показано, что чем больше в почве содержится $C_{\text{орг}}$, тем выше ее обеспеченность C_0 , но ниже степень минерализуемости содержащегося ОВ. Активный пул ПОВ чувствителен к агрогенным воздействиям на почву. За 18 лет эксперимента произошло существенное обеднение дерново-подзолистой супесчаной почвы углеродом, доступным микроорганизмам, доля которого составляла 8.8% от общего. При внесении бесподстилочного навоза его количество увеличилось в 3.6-4.4 раза, достигнув около 19% от $C_{\text{орг}}$ [Орлова и др., 2006]. Применение органических удобрений один раз в пять лет в дозах 25 и 50 т/га (5 и 10 т/га

севооборотной пашни) привело к увеличению в 1.9 и 2.4 раза обеспеченности выщелоченного чернозема C_0 по сравнению с контролем [Кузнецов и др., 2007]. Доля C_0 в почве этих вариантов достигала 2.7 и 3.2% от $C_{орг}$. Внесение минеральных удобрений на фоне навоза вызывало снижение содержания C_0 . Чем выше была доза минеральных удобрений, тем меньше содержалось потенциально-минерализуемого углерода. Особенно низкая обеспеченность потенциально-минерализуемым углеродом создавалась при внесении минеральных удобрений на втором фоне навоза, из-за чего его доля в общем $C_{орг}$ была даже меньше, чем на контроле

1.4. ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ОРГАНИЧЕСКОГО ЗЕМЛЕДЕЛИЯ

В настоящее время нет однозначной позиции по вопросу долгосрочной перспективы развития органического земледелия в мире. Предполагается, что дальнейший рост органического земледелия будет, по всей видимости, ограничиваться возможностями производства «органической» продукции, а не потребительским спросом [Горчаков, Дурманов, 2002]. Развивающиеся страны только начинают осваивать органическое сельское хозяйство, а организация инспекции, сертификации, технологий переработки органических продуктов доступны только крупным производителям.

Согласно одной группе экспертов, органическое земледелие, претерпев значительное расширение, становится устойчивой альтернативой интенсивному традиционному сельскому хозяйству при условии, что оно должно поддерживать в долговременной перспективе достигнутую урожайность, достаточный уровень почвенного плодородия, экономическую эффективность и при этом решать задачу защиты окружающей среды [Condrón, 2000; Gosling, Shepherd, 2003]. Исследования в Европе показали конкурентоспособность органического земледелия, способного обеспечивать высокие урожаи хорошего качества на протяжении долгого времени при минимальном употреблении внешних веществ, и соответственно помочь решению проблемы обеспечения высококачественной продукцией [Mäder et

al, 2007]. Касательно поддержания долгосрочной устойчивости агроэкосистем, сохранения и улучшения качества почвы и биоразнообразия, минимизации использования воды и энергии, получения качественных и безопасных продуктов питания, ослабления эмиссии парниковых газов органическое сельское хозяйство в большинстве случаев лучше традиционной сельскохозяйственной практики [Lotter, 2003; Kasperczyk, Knickel, 2006; Drinkwater et al, 1995; Badgley et al, 2007]. Одновременно отмечается вариабельность эффекта от органической системы в зависимости от конкретных видов сельскохозяйственных культур в севообороте и структуры посевов, а также более высокий нетто-выход энергии на единицу площади при традиционной системе.

По мнению других авторов, альтернативное земледелие не способно предотвратить снижение достигнутого уровня урожайности ни при частичной, ни при полной биологизации [Кульбида, Бородань, 1994]. Наиболее перспективным является сочетание традиционного и альтернативного земледелия – когда отдельные культуры в севообороте выращивают при частичной биологизации, а другие – на фоне обычного внесения удобрений, а биологическое возделывание культур в полном объеме допустимо временно, на высокоплодородных почвах и в научно-обоснованных севооборотах. Этот вывод согласуется с положением, что органическое земледелие возможно только на почвах с высоким естественным плодородием или созданным предварительным внесением удобрений, при научно-обоснованном плодосмене, высокой культуре земледелия и при условии, что систематический рост продуктивности культур не является первостепенной задачей [Минеев и др., 1993]. Следует заметить, что в соответствии с принципами органического земледелия получение «органической» продукции на почвах, ранее удобряемых минеральными удобрениями, возможно после длительного, от 10 до 20 лет, переходного периода.

Экономические и технологические реальности аграрного сектора России и в целом неблагоприятные для растениеводства агроклиматические условия на территории страны – основные причины, сдерживающие массовое распространение органического сельского хозяйства и земледелия. Более перспективным выглядит использование интегративных систем, предусматривающих интенсивное использование органических и минеральных источников поддержания плодородия почвы, биологических и химических средств защиты растений от вредителей и болезней, биотехнологических и агротехнических способов повышения устойчивости растений к неблагоприятным условиям окружающей среды и сохранения биоразнообразия.

К числу дискуссионных, прямо связанных с оценкой степени перспективности распространения органического сельского хозяйства, относится вопрос о вкладе аграрного сектора в эмиссию парниковых газов. Считается, что сельскохозяйственное производство является значимым источником парниковых газов [Flessa et al, 2002; Wang et al, 2004; Weiske et al, 2006]. В пяти регионах Европы на долю сельского хозяйства приходится около 49% метана и 63% закиси азота, что составляет примерно 10% от всей эмиссии парниковых газов в Европе, причем самым большим источником являются животноводческие фермы [Weiske et al, 2006, Olesen et al, 2006]. В тех регионах, где практикуется органическое сельское хозяйство и производится молочная продукция, эмиссия была выше, чем в хозяйствах традиционного типа, на 10%, составляя 1.6 и 1.4 кг-экв CO₂ на кг молока соответственно.

Показано, что в расчете на гектар сельскохозяйственных площадей в Германии совокупные эмиссионные выбросы при минеральной системе были выше, чем при органической (4.2 и 3.0 млн. т экв⁻¹. CO₂), а вклад сельскохозяйственного производства в общую эмиссию парниковых газов составил для закиси азота, метана и диоксида углерода соответственно 60, 25 и 15% [Flessa et al, 2002]. По данным этих авторов суммарные годовые

выбросы на единицу крупного рогатого скота составили для минеральной системы – 1.6 Мг т экв. CO₂ единицу крупного рогатого скота⁻¹, для органической – 1.3 соответственно. Среднегодовая эмиссия N-N₂O при полном цикле хозяйств, применяющих традиционную систему, составила 6.3 Мг/га, а у использующих органическую систему – 5.4 Мг/га [Flessa et al, 2002]. Наоборот, ежегодная секвестрация C-CH₄ в результате поглощения его из атмосферы была на 1/3 выше в хозяйствах практикующих традиционную систему по сравнению с альтернативной. Из этих исследований следовало, что при оценке различных систем земледелия с точки зрения их вклада в общую эмиссию парниковых газов необходим комплексный анализ и баланс всех выбросов, охватывая полный цикл производства, при этом животноводческая отрасль, ее масштабы – ключевой фактор, определяющий аграрную эмиссию парниковых газов. Подчеркивается, что необходимо проведение долгосрочных фундаментальных исследований в отношении различных сторон организации и методов ведения хозяйственной деятельности, как для понимания потенциала органического сельского хозяйства, так и для определения путей повышения его экономической эффективности и экологической целесообразности [Gomiero et al, 2008].

1.5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Система земледелия – основа сельскохозяйственного производства, а обеспечение его устойчивого развития – ключевая задача системы земледелия. Порождаемые традиционной сельскохозяйственной практикой проблемы деградации почвы, загрязнения окружающей среды и других экологических нарушений привели к разработке более совершенных почвозащитных, контурно-мелиоративных, адаптивно-ландшафтных, точных систем земледелия, а также альтернативных систем, таких как органическое (биодинамическое, биоорганическое, экологическое) и земледелие с ограниченными химическими нагрузками.

Если традиционные и адаптивно-ландшафтные системы земледелия в зависимости от степени их экологизации и биологизации предусматривают тотальное или частичное использование минеральных удобрений (минеральная и органо-минеральная системы удобрения) и иных агрохимикатов, то органическое земледелие базируется на применении только органических удобрений (навоз, компосты, сидераты, растительные остатки и др.) и отказе от генно-модифицированных культур. Органическое земледелие стало одним из самых быстрорастущих сегментов сельского хозяйства. Россия входит в число стран с наибольшей интенсивностью прироста площадей, занимаемых органическим земледелием площадей.

Данные о преимуществах традиционной или органической системы земледелия противоречивы: по ряду показателей отмечается преимущество традиционной системы, а по другим – органической. Урожайность культур при органической системе в среднем на 10-15% меньше, чем при традиционной системе, но недобор урожая компенсируется уменьшением затрат на производство продукции и улучшением ее биологического качества и потребительских свойств. Органическое земледелие способствует улучшению реакции почвенной среды, обеспечивает положительный баланс азота, стимулирует ферментативную активность почвы, способствует биоразнообразию, но не устраняет дефицитный баланс калия и особенно фосфора.

Содержание органического вещества является одним из ключевых показателей качества и здоровья почвы. Органическое вещество играет важнейшую роль в поддержании основных режимов почвы, определяющих ее плодородие, условия роста и развития растений, а также функционирование почвенной биоты, формирование благоприятных физических свойств, доступность микроэлементов, связывание тяжелых металлов и иммобилизацию пестицидов и их метаболитов. Любое изменение в системе землепользования, севообороте, способах обработки почвы, дозах

удобрений приводит к изменению в количественном и качественном составе органического вещества.

По характеру изменений валового содержания органического вещества и его качественных характеристик можно судить о направленности антропогенной эволюции почвы, экологическом состоянии почвы, развитии деградационных явлений, эффективности агротехнических приемов оптимизации почвенного плодородия. Как правило, валовое содержание органического вещества в почве определяется по органическому углероду, а качество почвенного органического вещества – по его фракционно-групповому составу, либо по содержанию химически лабильной фракции. Другой способ оценки состояния почвенного органического вещества, позволяющий диагностировать намечающиеся изменения (нарушения) биологических свойств почвы, состоит в определении активного пула органического вещества почвы.

Актуальными остаются следующие вопросы: Как связано повышение продуктивности почв с оптимизацией содержания, запасов, состава и качества почвенного органического вещества? Как меняется состояние и качество почвенного органического вещества при применении агротехнологий разной интенсивности? Какие процессы и факторы ответственны в первую очередь за динамику почвенного органического вещества, его чувствительность к действию природных и антропогенных факторов, степень реализации агроэкологических функций? В какой мере фракции водорастворимого, подвижного, лабильного и легкоразлагаемого органического вещества отражают реальную его доступность микроорганизмам и насколько они в действительности биологически активны? Можно ли в перспективе разработать и получить более точные, чувствительные и менее затратные способы диагностики состояния качества ПОВ?

ГЛАВА 2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

2.1. ОБЪЕКТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Объектом исследований была серая лесная почва, залегающая в разных местах на территории Заокского р-на Тульской области (поселок Заокский, деревня Болотово, деревня Дворяниново, село Ненашево) и южной части Серпуховского р-на Московской области (окрестности г. Пущино), приуроченных к Заокской зоне правобережья реки Ока.

2.1.1. КЛИМАТИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ, ПОЧВЕННЫЙ ПОКРОВ И МОРФОГЕНЕТИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА СЕРЫХ ЛЕСНЫХ ПОЧВ

Территория северной части Тульской области и юга Московской области относится к поясу умеренно континентального климата, занимающему переходное положение между умеренно влажными северо-западными районами Русской равнины и более теплыми и сухими районами ее юго-восточной части [Природа Тульского края, 2013]. С активизацией западных воздушных потоков зимой наступает общее потепление, наблюдаются обильные снегопады, а летом – облачная и дождливая погода. Вхождение северных арктических масс на территорию области вызывает резкое похолодание зимой, заморозки весной, в начале лета и осенью. Проникновение южных и юго-восточных воздушных масс сопровождается ясной жаркой погодой летом и аномальными оттепелями зимой. Как правило, преобладают северные и северо-западные ветры. Участкам возвышенностей, долин, котловин, оврагов занятых лесами, болотами, полями, перелесками свойственен особый микроклимат.

Средняя норма атмосферных осадков на территории Заокского и Серпуховского административных районов составляет от 550 до 750 мм, при этом характерны экстремальные отклонения от средней нормы с абсолютным минимумом и максимумом в 245 и 980 мм соответственно. Третья часть всех

выпадающих осадков в крае приходится на летние месяцы. Примерно каждый 3-4 год бывает резко засушливым.

Средние годовые температуры понижаются при движении с юга на север: от $+3.6^{\circ}\text{C}$ в Алексине до $+3.1^{\circ}\text{C}$ в г. Серпухове. Средняя температура января составляет около -10°C , а июля – от $+18.8^{\circ}\text{C}$. Продолжительность периода с положительными температурами составляет 220-225 дней, с температурой выше $+10^{\circ}\text{C}$ – 135-146 дней (сумма температур за этот период 2015-2355°), а вегетационного периода – 173-182 дня (с середины апреля до середины октября). Характерной особенностью являются заморозки, которые обычно начинаются 22 сентября, а прекращаются 19 мая. В зимние месяцы почвы промерзают до 60 см и глубже. В последние годы глубокое промерзание почвы – достаточно редкое явление. Устойчивый снежный покров высотой до 40 см образуется в конце ноября.

Территория севера Тульской области и юга Московской области характеризуется сложным почвенным покровом. Основными типами почв на территории Тульской области являются дерново-подзолистые почвы, серые лесные почвы и черноземы. Дерново-подзолистые почвы занимают 16%, серые лесные почвы – 35%, черноземы – 46%, пойменные – 3% от всего земельного фонда области. Серые лесные почвы залегают в основном в бассейне реки Ока и ее притоков Упы, Вашаны, Скниги, Беспуты, Осетра, сформировавшись под широколиственными лесами с кустарниковым подлеском и густым травостоем на протяжении как минимум голоцена [Ахтырцев, 1992]. Лесные массивы расположены хаотично, имеют небольшую площадь, приурочены в основном к территориям, занятым овражно-балочной сетью. Леса района представлены преимущественно мягколиственными породами деревьев. В породном составе древостоев доминируют березняки и осинники, встречаются островки широколиственных пород.

Почвообразующие породы разнообразные: карбонатные и бескарбонатные лессовидные суглинки и глины, моренные суглинки и

глины. Цвет суглинков чаще всего палевый с пятнами и разводами светло-охристого цвета. Лессовидные суглинки имеют очень плотное сложение в сухом состоянии, они тонко и сильно пористые, в них встречаются трещины [Алифанов, 1995].

На границе с черноземами распространены темно-серые и серые лесные почвы, а на границе с дерново-подзолистыми почвами – серые и светло-серые лесные почвы. Согласно почвенному районированию в южной части территории Серпуховского района Московской области преобладают дерново-подзолистые, светло-серые лесные почвы и серые лесные почвы. Степень эродированности серых лесных почв достигает 8–14%. Образование подтипов серых лесных почв обусловлено биоклиматическими условиями [Ахтырцев, 1979]. Южная граница распространения серых лесных почв в Центральном регионе проходит по линии Мценск (Орловская область) – Одоев – Тула – Венев – Михайлов (Рязанская область).

Занимая промежуточное положение между дерново-подзолистыми почвами и черноземами, серые лесные почвы характеризуются резкими колебаниями и многими морфологическими признаками и физико-химическими свойствами. Профиль серых лесных почв состоит из следующих генетических горизонтов: A_0 -AE-EB-B_{t1}-B_{t2}-BC-C. Разделение серых лесных почв на подтипы опирается на морфологические особенности горизонтов, содержание и состав гумуса, степень текстурной дифференциации профиля [Урусевская и др., 2000]. Соответственно выделяют три подтипа: светло-серые, серые и темно-серые лесные почвы. В профиле собственно серых лесных почв наблюдается отчетливая дифференциация валового химического состава по элювиально-иллювиальному типу. В иллювиальном горизонте B_t у серых лесных почв наблюдается накопление оксидов железа и алюминия и снижение содержания кремнекислоты.

По содержанию гумуса и интенсивности окраски серые лесные почвы подразделяются на светло-серые, серые и темно-серые. Серые лесные почвы

на севере и на юге области отличаются между собой степенью оподзоленности, мощностью гумусового горизонта и содержанием гумуса. Если в почвенном горизонте серых лесных почв на севере Тульской области мощность гумусового горизонта составляет 17-26 см, а содержание гумуса – 1.2-1.4%, то на границе с черноземами гумусовый горизонт увеличивается до 27-36 см, а содержание гумуса до 2.3-3.8% от массы почвы. Сверху до глубины 17-20 см окраска почвенного горизонта серая или светло-серая [Алифанов, 1995; Урусевская и др., 2000]. Структура мелкокомковая, непрочная, распыленная. Гранулометрический состав почвы – среднесуглинистый или тяжелосуглинистый. Переход в следующий горизонт хорошо заметен. Второй слой почвы до глубины 23-25 см имеет окраску светло-серую, а в сухом состоянии даже белесоватую от наличия присыпки кремнекислоты. Структура горизонтально-чешуйчатая. Сложение неплотное. Переход к следующему горизонту постепенный. На глубине 25–40 см окраска горизонта становится темно-коричневой, структура ореховатой. Присыпка кремнекислоты присутствует в виде пятен. Сложение плотное. В пределах этого горизонта нередко встречается второй гумусовый горизонт с характерной более темной окраской и повышенным содержанием органического углерода. Для горизонта, располагающего на глубине 42–96 см, характерна бурая окраска с коричневыми пятнами, на фоне которой в верхней части видна присыпка кремнекислоты в виде затеков по трещинам. Под почвенным слоем находится слой тяжелого покровного суглинка, подстилаемого толщей моренных отложений.

По бонитету серые лесные почвы относятся к группе хороших почв с высокой степенью их земледельческой освоенности, достигающей 50–80% [Важенина, 1984]. На протяжении последних 15-30 лет значительная часть сельскохозяйственных угодий выведена из оборота и находится под залежью [Люри и др., 2010]. Залежь представляет собой пример вторичной (восстановительной) сукцессии. Залежные участки покрыты разнотравьем, представленным пыреем ползучим, выюнком полевым, пижмой

обыкновенной, подмаренником мягким, молочаем Вальдштейна, одуванчиком лекарственным, фиалкой трехцветной, хвощем полевым и другими видами.

2.1.2. ПОРЯДОК ОТБОРА ПОЧВЕННЫХ ПРОБ В ПОЛЕВЫХ УСЛОВИЯХ НА УЧАСТКАХ ПАШНИ И ЗАЛЕЖИ

Влияние минеральной, органической и органо-минеральной систем удобрения на обеспеченность серой лесной почвы активным органическим веществом исследовали на полях с сельскохозяйственными культурами в сравнении с участками залежи, расположенными от посевов на расстоянии 50-200 м (табл. 4-7).

Таблица 4. Характеристика мест отбора почвенных проб в агроценозах с органической системой удобрения

№	Место, хозяйство	Система удобрения	Удобрение, дозы и способы внесения удобрений	Культура, агротехника, урожай в предыдущие годы
1а	Залежь на расстоянии 10 м. от огородного хозяйства «Павелко В.И.», пос. Заокский	Более 20 лет (Контроль для образца 2а), без удобрений	Нет	Нет
2а	Огородное хозяйство «Павелко В.И.», пос. Заокский,	Органическая, 18 лет	Навоз КРС, сырой перегной, компост в дозе 25 т/га ежегодно	Картофель, традиционная, ≈300 ц/га
1б	Залежь на расстоянии 10 м от поля №1 фермерского хозяйства, д. Болотово	Более 15 лет (Контроль для образца 2б), без удобрений, до 1995 г органическая	Нет	Органическая система удобрения до 1992 г
2б	Фермерское хозяйство, поле №1, д. Болотово	Органическая 15 лет	Навоз КРС в дозе 40-50 т/га ежегодно с осени	Картофель, 250-350 ц/га

Таблица 5. Характеристика мест отбора почвенных проб в агроценозах с минеральной системой удобрения

№	Место, хозяйство	Система удобрения	Удобрение, дозы и способы внесения удобрений	Культура, агротехника, урожай в предыдущие годы
3а	Залежь на расстоянии 50 м. от поля №1, д. Дворяниново	Более 30 лет (Контроль для образца 4а), без удобрений	Нет	Нет
4а	Фермерское хозяйство «Сенин», поле №1, д. Дворяниново	Минеральная, 3 года (ранее поля музея-усадьбы Болотова)	Нитрофоска N12-24P12-24K12-24 кг/га, Подкормка: Аммиачная селитра в дозе до 100 кг N/га	Озимая пшеница после овса, традиционная, 25-40 ц/га
3б	Залежь на расстоянии 30 м. от поля № 2, д. Дворяниново	Более 30 лет (Контроль для образца 4б) , без удобрений	Нет	Нет
4б	Фермерское хозяйство «Сенин», поле №2, д. Дворяниново	Минеральная, 3 года (ранее поля музея-усадьбы Болотова)	То же, что и под озимую пшеницу	Ячмень, традиционная, 19-30 ц/га
3в	Залежь на расстоянии 10 м. от поля № 3, д. Дворяниново	Более 30 лет (Контроль для образца 4в), без удобрений	Нет	Нет
4в	Фермерское хозяйство «Сенин», поле № 3, д. Дворяниново	Минеральная, 3 года (ранее поля музея-усадьбы Болотова)	То же, что и под озимую пшеницу и ячмень	Картофель, традиционная, 115-130 ц/га

Таблица 6. Характеристика мест отбора почвенных проб в агроценозах с минеральной системой удобрения культур, возделываемых по методу Миттлайдера

№	Место, хозяйство	Система удобрения	Удобрение, дозы и способы внесения удобрений	Культура, агротехника, урожай в предыдущие годы
5а	Залежь на расстоянии 60 м. от поля учебного центра «Миттлайдер», п. Заокский	Свыше 20 лет (Контроль для образцов 6а, 6б, 6в, 6г, 7а, 7б, 7в, 7г), без удобрений	Нет	Нет
6а	Учебный центр «Миттлайдер», гряды, п. Заокский.	Минеральная, 22 года	Основное удобрение: Азофоска (16-16-16) из расчета по 180 кг/га N, P ₂ O ₅ , K ₂ O. Подкормка: Аммиачная селитра 120-210 кг N/га дробно. Внесение микроэлементов Ca/Mg/B/Mo	Лук репчатый по Миттлайдеру, 150-194 ц/га
7а	Там же, между гряд,	Минеральная, 22 года	Нет	нет
6б	Там же, гряды	Минеральная, 22 года	То же, что под лук репчатый	Картофель по Миттлайдеру, 230-250 ц/га
7б	Там же, между гряд	Минеральная, 22 года	Нет	нет
6в	там же, гряды	Минеральная, 22 года	То же, что и под лук репчатый и картофель	Морковь по Миттлайдеру, 120-150 ц/га
7в	Там же, между гряд	Минеральная, 22 года	Нет	нет
6г	Там же, гряды	Минеральная, 22 года	То же, что под лук репчатый, картофель и морковь	Капуста по Миттлайдеру, 620-750 ц /га
7г	Там же, между гряд	Минеральная, 22 года	Нет	нет

Таблица 7. Характеристика мест отбора почвенных проб в агроценозах с органо-минеральной системой удобрения

№	Место, хозяйство	Система удобрения	Удобрение, дозы и способы внесения удобрений	Культура, агротехника, урожай в предыдущие годы
8а	Залежь, 50 м от поля № 1 ООО имени Кирова, с. Ненашево	Более 50 лет (Контроль для образца 9а), без удобрений	нет	нет
9а	Поле № 1 ООО имени Кирова, с. Ненашево	Органо-минеральная, более 50 лет	Основное удобрение – азофоска 30 кг/га NPK, подкормка – аммиачная селитра до 70 кг N/га на фоне 50 т/га полуперепревшего навоза КРС	Пшеница яровая (Зерно-травяно-пропашной севооборот), традиционная, 27-36 ц /га
8б	Залежь, 100 м от поля № 2 ООО имени Кирова, с. Ненашево	Более 50 лет (Контроль для образца 9б), без удобрений	нет	нет
9б	Поле № 2 ООО имени Кирова, с. Ненашево	Органо-минеральная, более 50 лет	Последействие	Многолетние травы (Зерно-травяно-пропашной севооборот), традиционная, 105 ц /га
8в	Залежь, 30 м от поля № 3 ООО имени Кирова, с. Ненашево	Более 50 лет, (Контроль для образца 9в), без удобрений	Нет	Нет
9в	Поле № 3 ООО имени Кирова, с. Ненашево	Органо-минеральная, более 50 лет	Полуперепревший навоз КРС 50 т/га, основное удобрение – азофоска 30 кг/га NPK, подкормка – аммиачная селитра до 70 кг N/га	Кукуруза на силос (Зерно-травяно-пропашной севооборот), традиционная, 250-400 ц/га

Залежи – это сельскохозяйственные угодья, ранее использовавшиеся как пашня, но не используемые больше года под посев сельскохозяйственных культур и под пар. На участках залежи, в отличие от пашни, почва не подвергается обработке, а растительная биомасса преимущественно поступает в почву и включается в состав почвенного органического вещества, обеспечивая замкнутость циклов углерода и минеральных элементов. В то же время, залежи по своим био-экологическим параметрам ближе к пахотным угодьям, чем естественные биогеоценоозы с лесной растительностью.

Исследуемый массив включал два поля картофеля с органической системой удобрения, три поля с минеральным (озимая пшеница, ячмень, картофель), три поля с органо-минеральным (яровая пшеница, многолетние травы, кукуруза на силос) и четыре участка с интенсивным минеральным удобрением под овощные культуры (лук репчатый, картофель, морковь, капуста), возделываемые по методу Миттлайдера. Продолжительность использования органической системы удобрения (25-50 т/га навоза КРС ежегодно) составляет 15-20 лет, органо-минеральной (N30P30K30 на фоне периодического внесения 50 т/га навоза КРС) – 50 лет, минеральной под зерновые культуры (N112-130P12-30K12-30) – 3 года, минеральной системы под овощные культуры и картофель по Миттлайдеру (до N300-400P180K180 кг/га) – 20 лет. Урожайность картофеля с органической системой удобрения за последние четыре года составляла в среднем 300 ± 40 ц/га, яровой пшеницы и зеленой массы кукурузы на фоне органо-минеральной системы – 31 ± 5 и 325 ± 106 , озимой пшеницы, ячменя и картофеля при минеральной системе, соответственно, 33 ± 8 , 25 ± 8 и 123 ± 11 ц/га, а лука, картофеля, моркови и капусты – 172 ± 31 , 238 ± 10 , 135 ± 13 и 667 ± 72 ц/га, соответственно. В хозяйствах использовалась традиционная агротехника возделывания зерновых культур, картофеля и многолетних трав. Особенностью метода Миттлайдера является размещение картофеля и

овощных культур на грядках, применение только минеральных удобрений, которые вносятся в почву гряд, и наличие междурядий, незанятых растениями, неудобренных и регулярно пропалываемых [Mittleider, 1986].

Образцы почвы отбирались весной до посева и осенью после уборки урожая культур на одних и тех же полевых участках из слоя 0-20 см в двадцати разных местах каждого поля через 5-10 м между точками и в десяти точках залежей, расположенных в 50-200 м от посевов. Почва под залежью рассматривалась в качестве контроля удобряемым и обрабатываемым участкам пашни. После отбора образцы почвы с каждого поля и залежи смешивались и высушивались на открытом воздухе с удалением видимых остатков растений и мезофауны в ходе периодического просеивания через сито с диаметром отверстий 3 мм. Подготовленный таким образом массив воздушно-сухих образцов почвы, включающий в себя по 25 проб весеннего и осеннего отборов, использовался для определения агрохимических свойств и активного органического вещества. Агрохимические показатели среднесуглинистой серой лесной почвы сравниваемых массивов пашни и залежей приведены в разделе 3.1.

2.1.3. УСЛОВИЯ ПРОВЕДЕНИЯ МИКРОПОЛЕВОГО ОПЫТА

Исследование количественных и качественных изменений в органическом веществе серой лесной почвы при ежегодном внесении возрастающих доз минеральных и органических удобрений проводили в микрополевом опыте, особенность которого состоит в том, что устраняется почвенная пестрота, четче реализуется основной действующий фактор, но вместе с тем сохраняется вся совокупность естественных почвенных и экологических факторов. Схему опыта разрабатывали исходя из следующих задач: создать модели традиционной (минеральной) и органической системы земледелия, обеспечить количественные и качественные изменения почвенного органического вещества внесением возрастающих доз минеральных и органических удобрений, получить удельные величины

обеднения или обогащения почвы активным органическим веществом на единицу вносимого удобрения.

Опыт проводился в сосудах без дна площадью 0.25 м^2 ($0.5 \times 0.5 \times 0.3$ м). Сосуды были установлены в 2000 г и заполнены серой лесной почвой с неудобренного массива Опытной-полевой станции ИФХиБПП РАН. С 2000 по 2004 в сосудах выращивали кукурузу и овес, используя дозы минеральных удобрений не выше $N_{120}P_{120}K_{120}$. В 2005 г был произведен уравнильный посев рапса и почва была переведена в залежь. Ежегодно естественная растительность, растущая в сосудах, скашивалась и удалялась с поверхности почвы. В мае 2011 почва в сосудах была перекопана на глубину 0-20 см, частично изъята из сосудов, смешана и вновь засыпана в сосуды в случайном порядке. После нивелирования агрохимические показатели почвы были следующими: $pH_{KCl} - 4.96 \pm 0.16$, $C_{орг} - 0.94 \pm 0.03\%$ от массы почвы, $N_{общ} - 100 \pm 1$, $N_{мин}$, P_2O_5 и $K_2O - 1.98 \pm 0.04$, 8.82 ± 1.06 и $7.33 \pm 0.18 \text{ мг/100 г}$ соответственно, «физическая» глина – $32 \pm 1\%$.

Опыт проводился по схеме: 1) Чистый пар, 2) Без удобрений (контроль), 3) $N_{1P}K_1$, 4) $N_{2P}K_2$, 5) $N_{3P}K_3$, 6) $N_{4P}K_4$, 7) Свежий навоз КРС из расчёта 25 т/га, 8) То же 50 т/га, 9) То же 75 т/га, 10) То же 100 т/га. В первый год опыта минеральные удобрения вносили с шагом из расчета по 90 кг/га действующего вещества, а во второй год – азот с шагом 90 кг/га, а фосфор и калий – 75 кг/га. В качестве удобрений использовали карбамид, простой суперфосфат, сернокислый калий, свежий навоз КРС (среднее за два года содержание сухого вещества 20.4%, $C_{орг} - 35.5\%$, $N_{общ} - 1.73\%$, $P_2O_5 - 1.22$ и $K_2O - 2.00\%$ на сухое вещество), которые смешивали с 0-20 см слоем весной до посева культур. Количества поступающего с навозом КРС азота были практически эквивалентны дозам минеральных удобрений, калия – несколько больше, а фосфора – меньше. Повторность опыта трехкратная.

В 1-й год опыта возделывали сахарную свеклу, которая устойчива к экстремально высоким дозам минеральных и органических удобрений, применяемых в качестве основного удобрения до посева. Во 2-й год опытной

культурой была кукуруза. После всходов в каждом сосуде оставляли по два растения сахарной свеклы и по 6 растений кукурузы, что обеспечивало нормальную площадь питания. Уборку урожая культур проводили в сентябре, учитывая массу ботвы и корнеплодов сахарной свеклы, а для кукурузы свежую надземную массу.

Образцы почвы отбирались после уборки урожая из слоя 0-20 см. Пробы почвы с каждого повторения смешивались и высушивались на открытом воздухе с удалением видимых остатков растений и мезофауны в ходе просеивания через сито с диаметром отверстий 3 мм. Воздушно-сухие образцы использовались для определения активного органического вещества, и агрохимических свойств.

2.2. МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

2.2.1. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПОЧВЫ

В растертых до частиц <1 мм образцах почвы определяли гранулометрический состав [Вадюнина, Корчагина, 1986], обменные катионы Ca^{2+} и Mg^{2+} [Аринушкина, 1970], обменную и гидролитическую кислотность [Теория и практика..., 2006], общий азот и сумму $\text{N}_{\text{мин}}$ ($\text{N-NH}_4^+_{\text{обм}} + \text{N-NO}_3^-$) [Кудеяров, 1972; Бочкарев, Кудеяров, 1982], подвижные формы фосфора (P_2O_5) и калия (K_2O) [Теория и практика..., 2006].

Содержание валового органического углерода ($\text{C}_{\text{орг}}$) в почве определяли в растертых до частиц <0.25 мм образцах по методу Тюрина [Теория и практика..., 2006]. Фракцию растворенного углерода, экстрагируемого раствором 0.5 н. K_2SO_4 при соотношении почва / раствор 1 к 4 ($\text{C}_{\text{ср}}$), определяли после окисления раствором бихромата калия в концентрированной серной кислоте при температуре 140°C колориметрическим методом относительно дистиллированной воды, используя в качестве шкалы разные концентрации глюкозы. Подвижный щелочнорастворимый углерод ($\text{C}_{\text{подв}}$), извлекаемый 0.1 н. NaOH , определяли по Тюрину.

2.2.2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ АКТИВНОГО ОРГАНИЧЕСКОГО ВЕЩЕСТВА ПОЧВЫ

Теоретическое обоснование метода дано в работах [Семенов, Тулина, 2011; Семенов и др., 2006, Семенов и др. 2008]. Навески воздушно-сухой почвы по 20 г помещали в стеклянные флаконы и ставили на сутки в термостат с температурой 65-67°C. Быстрое высушивание при прогревании не вызывает полной стерилизации почвы, но приводит к обезвоживанию клеток. После увлажнения одни клетки, чтобы сохранить свою целостность вследствие резкого изменения давления, выбрасывают цитоплазматические вещества, поддерживающие тургор, наружу. У других клеток происходит разрыв клеточных стенок и выброс внутриклеточного содержимого в почву. Перенесшие высушивание и последующее увлажнение микроорганизмы начинают быстро утилизировать микробные остатки на дыхание и рост новой биомассы с бурным выделением $C-CO_2$. Прогревание почвы позволяет «зафиксировать» быстро оборачиваемую фракцию почвенного органического вещества (**ПОВ**), компоненты которой находятся в непрерывном обороте. В биокинетическом способе агентом фракционирования почвенного органического вещества выступают аборигенные микроорганизмы, почва инкубируется при стабильной температуре и влажности, в рамках одной процедуры устанавливается большое число показателей, характеризующих состояние ПОВ и доступность углерода почвенным микроорганизмам [Семенов и др., 2006]. Биокинетический способ позволяет выявить новые характеристики динамики углерода в почве, пригодные для моделирования потоков углерода в системе почва - атмосфера, которые затруднительно или нельзя получить с помощью химических экстракций.

После доведения прогретых образцов до комнатной температуры во флаконы добавляли по 5 мл дистиллированной воды до уровня влажности 25% от массы почвы, после чего их закрывали силиконовыми пробками. Влажность почвы поддерживалась постоянной на протяжении всего времени

инкубации образцов при температуре 22°C. Продолжительность инкубации составляла 160-163 суток, что соизмеримо с вегетационным периодом. Повторность – трехкратная. Первое измерение концентрации С-СО₂ в газовой фазе инкубируемых образцов проводили через 3-4 часа после увлажнения, а последующие – через один, два, три дня и один раз в неделю. За весь период инкубации было проведено по 36-40 отборов для каждого из исследуемых массивов почвенных образцов (50 образцов весеннего и осеннего отбора в производственных условиях и 20 образцов – первого и второго года микрополевого опыта). После каждого срока отбора газовых проб флаконы с инкубируемыми образцами проветривали в течение 20 мин и закрывали силиконовой пробкой до следующего измерения. Газовые пробы анализировали на хроматографе Кристалл-Люкс-4000М. Определяли скорость выделения С-СО₂ (мг/100 г в сутки) за время экспозиции по формуле 1.

$$C\text{-CO}_2 = \frac{\Delta\text{CO}_2 \cdot 12 \cdot V \cdot 60 \cdot 100}{100 \cdot 22.4 \cdot \Delta t \cdot m} \quad (1),$$

где ΔCO_2 – прирост СО₂, об. %; 12 – атомная масса углерода; V – объем воздуха во флаконе над почвой, мл; 60 – пересчет на час; 100 – пересчет на 100 г почвы; 22.4 – объем грамм-молекулы СО₂, мл; Δt – время экспозиции, мин; m – навеска почвы, г.

Кумулятивная величина продуцирования С-СО₂ (мг/100 г) устанавливалась путем прибавления количества выделившегося углерода в каждый срок измерения к сумме за предыдущие сроки. Образцы кумулятивных кривых выделения С-СО₂ инкубируемыми образцами почвы приведены на рисунках 4-6. Расчет содержания потенциально-минерализуемого (активного) углерода органического вещества (С₀) в почве производили по кумулятивному количеству С-СО₂, выделившегося за все время инкубации, используя уравнение 2.

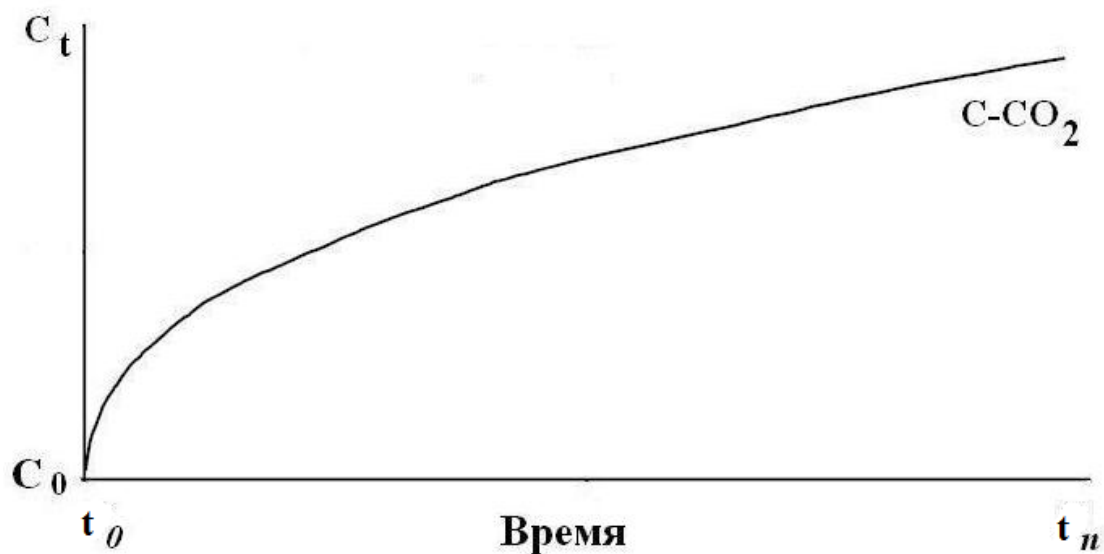


Рис. 4. Образец динамики кумулятивного продуцирования C-CO₂ почвой за время (t_n) инкубации и установления содержания потенциально-минерализуемого углерода (C_0) на момент начала инкубации (t_0)

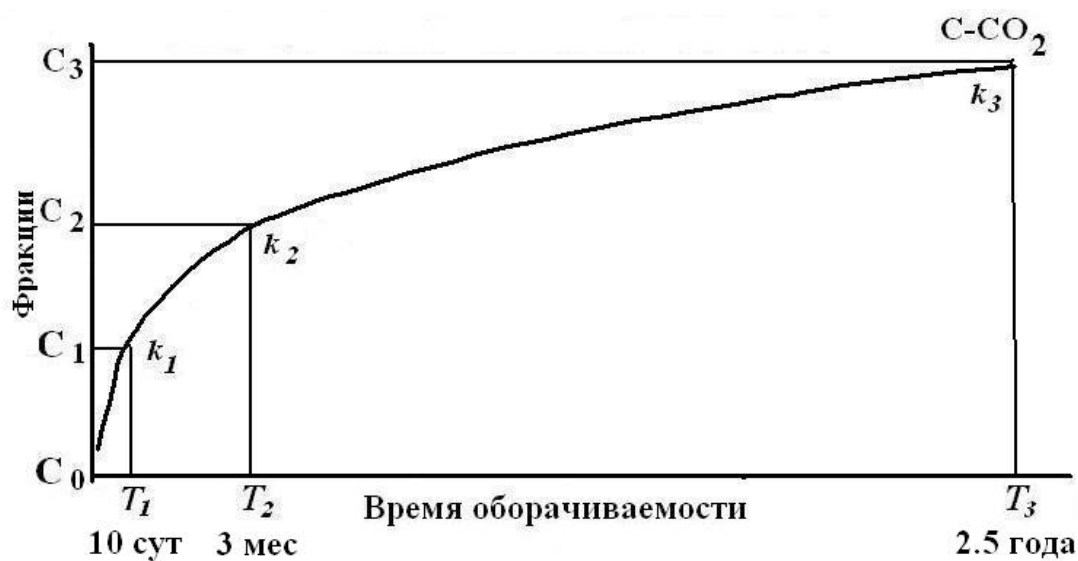


Рис. 5. Образец кумулятивной кривой, аппроксимированной трехкомпонентным уравнением экспоненциальной регрессии

Аппроксимируя полученные в динамике кумулятивные количества C-CO₂ за весь период инкубации трехкомпонентным уравнением экспоненциальной регрессии (уравнение 3), вычисляли содержание углерода легко (C_1 , $k_1 > 0.1$ сут⁻¹), умеренно (C_2 , $0.1 < k_2 > 0.01$ сут⁻¹) и трудно

минерализуемых (C_3 , $0.01 < k_3 > 0.001 \text{ сут}^{-1}$) компонентов активного пула ПОВ (рис. 5).

Если с помощью трехкомпонентного уравнения получали недостоверные коэффициенты, то использовали двухкомпонентные уравнения 4 и 5, выделяя в этом случае легко и умеренно минерализуемые компоненты ПОВ, либо легко и трудно минерализуемые (рис. 6).

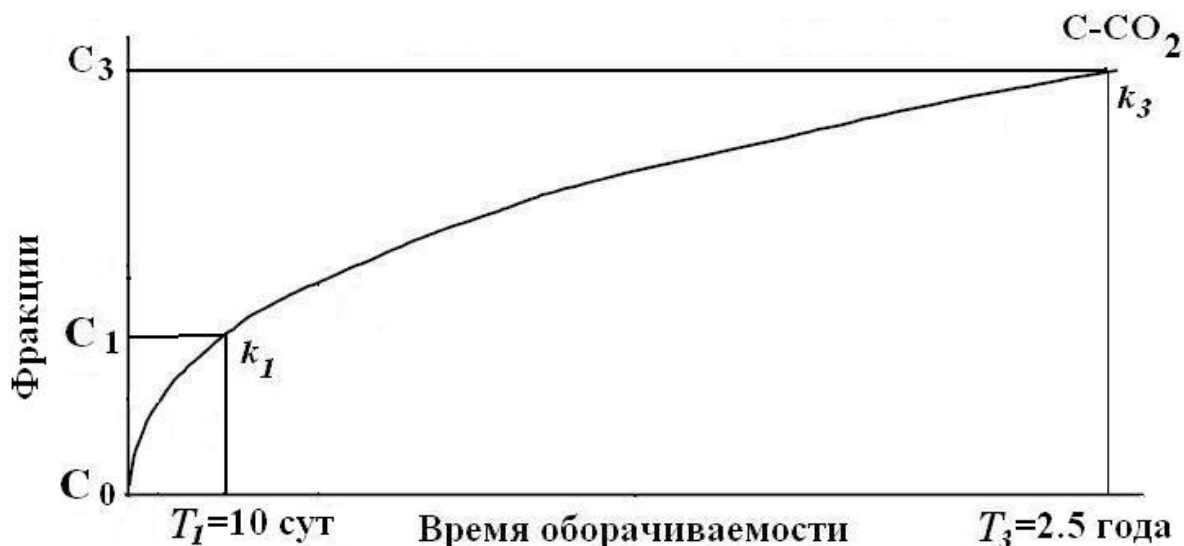


Рис. 6. Образец кумулятивной кривой, аппроксимированной двухкомпонентным уравнением экспоненциальной регрессии

$$C_t = C_0 \cdot (1 - \exp(-k \cdot t)) \quad (2),$$

$$C_t = C_1 \cdot (1 - \exp(-k_1 \cdot t)) + C_2 \cdot (1 - \exp(-k_2 \cdot t)) + C_3 \cdot (1 - \exp(-k_3 \cdot t)) \quad (3),$$

$$C_t = C_1 \cdot (1 - \exp(-k_1 \cdot t)) + C_2 \cdot (1 - \exp(-k_2 \cdot t)) \quad (4),$$

$$C_t = C_1 \cdot (1 - \exp(-k_1 \cdot t)) + C_3 \cdot (1 - \exp(-k_3 \cdot t)) \quad (5),$$

где: C_t – кумулятивное количество $C\text{-CO}_2$ (мг/100 г почвы) за время t (сутки);

C_0 – содержание потенциально минерализуемого углерода ПОВ (мг/100 г);

C_1, C_2, C_3 – содержание легко, умеренно и трудно минерализуемого углерода ПОВ (мг/100 г);

$k \dots k_3$ – константы скорости минерализации ПОВ (сутки^{-1});

Величина C_0 характеризует содержание потенциально-минерализуемого (активного) углерода до начала инкубации и дает общее

представление о минерализационной способности ПОВ, а $C_1...C_3$ фракций показывает степень участия разных компонентов активного пула ПОВ в его обороте. Сумма $C_1...C_3$ фракций, как правило выше, чем C_0 , поскольку учитывает обмен углерода между фракциями в течение инкубации. Необходимо подчеркнуть, что подразделение активного пула ПОВ на фракции направлено не столько на выявление количественных различий по обеспеченности почв активным органическим веществом, которое можно установить и по C_0 , сколько для оценки способности разных компонентов ПОВ к оборачиваемости. Углеродминерализующую активность (УА, мг/100 г в сутки) почвы оценивали по индексу, полученному умножением содержания C_0 (мг/100 г) на константу скорости минерализации (k , сут⁻¹).

Вычисление биокинетических параметров C_0 , $C_1...C_3$, $k...k_3$ проводили по известным значениям C_t и t методом нелинейной оценки программы Statistica 6.0. Коэффициенты уравнений 2-5 с уровнем значимости $P > 0.05$ отвергались. Для дисперсионного и регрессионного анализа данных, вычисления коэффициентов корреляций и графической иллюстрации экспериментального материала использовали программу MS Excel. Экспериментальные данные приведены в виде средних величин и их стандартных отклонений.

ГЛАВА 3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

3.1. АГРОХИМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СЕРОЙ ЛЕСНОЙ ПОЧВЫ ПРИ РАЗНЫХ СИСТЕМАХ УДОБРЕНИЯ И ВНЕСЕНИИ ВОЗРАСТАЮЩИХ ДОЗ МИНЕРАЛЬНЫХ И ОРГАНИЧЕСКИХ УДОБРЕНИЙ

Серые лесные почвы – распространенный почвенный тип лесостепной зоны Европейской части России. Степень variability физико-химических и агрохимических свойств серых лесных почв зависит от длительности и характера их использования в земледелии, географии расположения и геоморфологии залегания [Ахтырцев, Шевченко, 1965]. Серые лесные почвы обладают высокой водоудерживающей способностью, имеют хорошую водоподъемную способность благодаря наличию большого количества илистых частиц, поэтому при окультуривании, способствующему улучшению их агрохимических, физических и биологических свойств, достигаются высокие и устойчивые урожаи культур [Лепнев, Корабельников, 1964; Никитишен, 2012]. Интенсивное сельскохозяйственное использование серых лесных почв предусматривает применение минеральных и органических удобрений, обеспечивающих вместе с другими рекомендуемыми агроприемами, сохранение и воспроизводство почвенного плодородия.

3.1.1. ВЛИЯНИЕ СИСТЕМЫ УДОБРЕНИЯ НА pH И ПИТАТЕЛЬНЫЙ РЕЖИМ ПОЧВЫ

Результаты длительных опытов показывают, что систематическое внесение как минеральных, так и органических удобрений способствует увеличению содержания в почве общего азота, подвижных форм фосфора и калия, обеспечивая расширенное воспроизводство плодородия, а размеры накопления питательных элементов в почве зависели от вида, доз, соотношения, форм и длительности применения удобрений, эффективности использования растениями питательных веществ и их подверженности

потерям, почвенно-климатических условий и других факторов [Лазурский, Кардиналовская, 1966; Тюлин и др., 1967; Бугаев, Осипова, 1968; Осипова, Хлыстовский, 1969; Иванова и др., 1971; Береснев и др., 1989]. Совместное применение в севообороте минеральных и органических удобрений оказывается зачастую более выгодным с точки зрения улучшения свойств почвы, повышения урожайности культур, экономии удобрений и снижения рисков экологических нарушений [Петрова, 1965; Лыков, 1982; Мерзлая и др., 2011; Мерзлая и др., 2012].

Мониторинг агрохимических свойств показал, что серая лесная почва залежей имела кислый или слабокислый pH, тогда как пашни – от слабокислого при применении минеральных удобрений, до нейтрального с органической системой удобрения (табл. 8). В отличие от залежей пахотная почва характеризовалась существенно меньшей гидролитической кислотностью, особенно при органической системе удобрения. В удобренных грядах вариантов с возделыванием культур по Миттлайдеру величины обменной и гидролитической кислотности были выше, чем в неудобренных междурядьях. По обеспеченности подвижными формами фосфора и калия пахотная почва соответствовала среднему уровню окультуренности. При этом в почве с органической системой удобрения не обнаруживался недостаток подвижного фосфора, как это часто бывает в условиях органического земледелия. Можно заметить, что при органической системе удобрения происходило обогащение почвы общим азотом относительно залежей, тогда как при минеральном и органо-минеральном удобрении – обеднение. Наоборот, систематическое применение минеральных удобрений создавало повышенный фон обеспеченности почв минеральным азотом.

Применение возрастающих доз минеральных и органических удобрений способствовало быстрому изменению агрохимических показателей серой лесной почвы (табл. 9). В среднем за два года pH_{KCl} почвы в вариантах с минеральными удобрениями снизился на 0.34-0.92 по сравнению с исходным состоянием до закладки опыта. При этом, чем выше была доза NPK, тем

существеннее подкислялась почва. Подкисление почвенной среды является характерным следствием систематического применения минеральных удобрений [Минеев, Ремпе, 1991; Гомонова, Минеев, 2012; Чеботарев и др., 2009].

Таблица 8. Свойства серой лесной почвы под залежью и сельскохозяйственными культурами с разными системами удобрения

Параметр	Варианты								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
C _{орг} , %	<u>2.04</u> 1.92	<u>1.98</u> 2.07	<u>2.20</u> 2.11	<u>1.59</u> 1.61	<u>1.35</u> 2.01	<u>1.30</u> 1.24	<u>1.40</u> 1.43	<u>1.69</u> 1.74	<u>1.37</u> 1.38
pH _{KCl}	<u>4.8</u> 5.3	<u>6.8</u> 6.6	<u>5.2</u> 5.0	<u>5.8*</u> 5.5	<u>4.9*</u> 4.5	<u>5.1</u> 5.2	<u>5.6</u> 5.6	<u>4.5</u> 4.3	<u>5.5*</u> 5.2
H _г , мг-экв/100 г	<u>6.3*</u> 2.6	<u>0.7</u> 0.7	<u>4.0</u> 2.8	<u>2.8</u> 1.8	<u>4.1</u> 6.0*	<u>4.6*</u> 2.7	<u>3.3*</u> 2.0	<u>6.6*</u> 5.0	<u>2.9</u> 2.7
N _{общ} , мг/100 г	<u>142</u> 118	<u>162</u> 131	<u>135</u> 120	<u>108</u> 105	<u>118</u> 114	<u>106*</u> 92	<u>98</u> 95	<u>133*</u> 117	<u>103</u> 101
N _{мин} , мг/100 г	<u>2.1</u> 1.7	<u>2.8*</u> 1.4	<u>2.4*</u> 1.5	<u>3.2*</u> 1.8	<u>2.7*</u> 1.2	<u>4.2*</u> 2.1	<u>3.8*</u> 1.2	<u>2.9*</u> 1.3	<u>3.4*</u> 2.0
K ₂ O, мг/100 г	<u>13.7</u> 15.2	<u>24.0</u> 17.7	<u>12.4</u> 12.1	<u>22.6*</u> 17.1	<u>8.5</u> 11.1*	<u>32.5</u> 28.0	<u>17.2</u> 18.2	<u>6.6</u> 10.3*	<u>9.3</u> 14.8*
P ₂ O ₅ , мг/100 г	<u>11.2</u> 11.5	<u>20.7</u> 19.5	<u>6.8</u> 8.0*	<u>15.1*</u> 10.6	<u>6.6</u> 4.4	<u>27.6</u> 29.0	<u>24.4*</u> 18.8	<u>6.3*</u> 3.3	<u>25.2</u> 25.5
Ca ²⁺ + Mg ²⁺ , мг-экв/100 г	<u>19.3</u> 17.2	<u>28.3</u> 27.7	<u>19.4</u> 17.9	<u>17.3</u> 15.7	<u>15.8</u> 13.6	<u>13.5</u> 13.6	<u>13.5</u> 14.8	<u>14.1</u> 13.3	<u>13.8</u> 11.8
«Физический» песок, %	55	58	54	57	60	65	67	63	64
«Физическая» глина, %	45	42	46	44	40	35	33	37	36

Варианты: 1 – Залежь (контроль варианту 2); 2 – Органическая система (в среднем для двух полей); 3 – Залежь (контроль варианту 4); 4 – Минеральная система (в среднем для трех полей); 5 – Залежь (контроль вариантам 6 и 7); 6 – Минеральная система по Миттлайдеру (гряды, в среднем для четырех полей); 7 – То же (межгрядья, в среднем для четырех полей); 8 – Залежь (контроль варианту 9); 9 – Органо-минеральная система (в среднем для четырех полей).

Над чертой – весенний отбор почвы, под чертой – осенний отбор. Гранулометрический состав определялся в весенний отбор почвенных проб

*Разница средних весеннего и осеннего отборов существенна по t_{0.5}-критерию.

В отличие от вариантов с минеральными удобрениями при внесении навоза pH_{KCl} почвы возрастал, особенно при высоких дозах. Подобное действие органических удобрений на pH почвы отмечалось и в более ранних исследованиях [Криштапоните, Майкштенене, 2005]. По другим данным на нейтральных почвах минеральные удобрения не повышали кислотность почвы [Вендило и др., 1986], а внесение навоза из-за наличия органических кислот с карбоксильными и фенольными группами, снижало pH почвенного раствора [Liang et al, 2012].

Таблица 9. Изменение агрохимических свойств серой лесной почвы при ежегодном внесении возрастающих доз минеральных и органических удобрений

Вариант	Показатель*					
	pH_{KCl}	$C_{орг}, \%$	$N_{общ}$	$N_{мин}$	P_2O_5	K_2O
	мг/100 г					
1. Чистый пар	<u>4.87</u>	<u>0.92</u>	<u>104</u>	<u>1.03</u>	<u>8.31</u>	<u>7.65</u>
	5.04	0.94	102	1.41	8.64	10.3
2. Без удобрений (контроль)	<u>4.87</u>	<u>0.96</u>	<u>103</u>	<u>0.88</u>	<u>8.54</u>	<u>7.75</u>
	5.05	0.98	101	1.15	9.70	9.98
3. N1P1K1	<u>4.51</u>	<u>0.97</u>	<u>110</u>	<u>1.19</u>	<u>10.1</u>	<u>11.6</u>
	4.73	0.99	102	2.36	12.3	12.9
4. N2P2K2	<u>4.46</u>	<u>0.95</u>	<u>114</u>	<u>1.27</u>	<u>12.7</u>	<u>13.6</u>
	4.48	1.01	110	2.43	17.0	17.6
5. N3P3K3	<u>4.04</u>	<u>0.95</u>	<u>118</u>	<u>2.43</u>	<u>18.5</u>	<u>19.8</u>
	4.40	1.00	114	2.83	22.8	21.8
6. N4P4K4	<u>3.95</u>	<u>0.98</u>	<u>125</u>	<u>3.88</u>	<u>19.1</u>	<u>29.4</u>
	4.14	1.01	117	3.20	27.7	30.4
7. Навоз 25 т/га	<u>4.92</u>	<u>1.07</u>	<u>121</u>	<u>1.06</u>	<u>9.55</u>	<u>13.4</u>
	5.36	1.18	116	0.49	11.0	14.2
8. То же 50 т/га	<u>4.98</u>	<u>1.12</u>	<u>128</u>	<u>1.27</u>	<u>10.8</u>	<u>13.8</u>
	5.42	1.26	125	0.67	16.1	16.5
9. То же 75 т/га	<u>5.10</u>	<u>1.22</u>	<u>131</u>	<u>1.29</u>	<u>12.0</u>	<u>14.0</u>
	5.50	1.45	127	0.99	17.4	17.3
10. То же 100 т/га	<u>5.30</u>	<u>1.27</u>	<u>136</u>	<u>1.34</u>	<u>15.6</u>	<u>16.1</u>
	5.77	1.55	143	1.73	23.2	22.7

*Примечание: Над чертой – 1-й год опыта, под чертой – 2-й год опыта

Увеличение содержания подвижных форм фосфора и калия в почве обеспечивает применение как минеральных, так и органических удобрений [Вендило и др., 1986; Минеев и др., 1993; Криштапоните, Майкштенене, 2005]. В нашем опыте за два года содержание K_2O и P_2O_5 в серой лесной почве увеличивалось по сравнению с исходными показателями при минеральной системе в 1.8-4.2 и 1.3-3.1 раза соответственно, а при органической системе в 1.9-3.1 и 1.3-2.6 раза (табл. 9).

Внесение органических удобрений давало более существенное обогащение почвы общим азотом по сравнению с минеральными удобрениями, тогда как в почве при минеральной системе накапливалось больше минеральных форм (табл. 9). В первый год опыта после уборки урожая в почве с минеральными удобрениями оставалось в среднем в 1.8 раза больше $N_{мин}$, чем с органическими удобрениями, а во второй год – в 2.8 раза. Особенно высокое содержание остаточного минерального азота, который может быть потерян за осенне-зимне-весенний период, было в почве с экстремально высокими дозами минеральных удобрений. Для предотвращения экологических нарушений при применении минеральных азотных удобрений рекомендуется внесение компенсирующих количеств свежего органического материала с широким отношением C/N, чтобы активизировать иммобилизационные процессы [Кудеяров, 1999; Семенов и др., 1995]. Серьезные экологические нарушения в виде унификации и угнетения микробного сообщества, накопления тяжелых металлов, поступления нитратов в водоисточники и в продукцию растениеводства возможны и при применении органических удобрений в повышенных дозах и без строгого соблюдения требований по срокам и способам их внесения [Минеев, Ремпе, 1991; Васильев и др., 1980; Кудеяров и др., 1984; Соколов и др., 1990].

Применение минеральных удобрений повышало по сравнению с неудобренным контролем урожай ботвы и корнеплодов сахарной свеклы на

24-146 и 39-108% соответственно, а биомассы кукурузы на 127-380% (табл. 10).

Таблица 10. Влияние возрастающих доз минеральных и органических удобрений на урожай культур

Вариант	Сахарная свекла (1-й год опыта)				Кукуруза (2-й год опыта)	
	Корнеплоды		Ботва		Биомасса	
	кг/м ²	%	кг/м ²	%	кг/м ²	%
Без удобрений (контроль)	3.2 ± 0.2	100	1.6 ± 0.2	100	1.6 ± 0.1	100
N1P1K1	4.4 ± 0.2	139	2.0 ± 0.1	124	3.7 ± 0.2	227
N2P2K2	5.8 ± 0.3	184	4.0 ± 0.4	246	6.7 ± 0.2	407
N3P3K3	6.6 ± 0.4	208	3.7 ± 0.1	227	7.9 ± 0.4	480
N4P4K4	6.2 ± 0.4	197	3.3 ± 0.2	208	7.1 ± 0.6	436
Навоз 25 т/га	4.0 ± 0.5	127	2.3 ± 0.1	142	3.1 ± 0.2	186
Навоз 50 т/га	5.2 ± 0.6	164	2.9 ± 0.2	182	4.2 ± 0.2	254
Навоз 75 т/га	5.7 ± 0.3	180	3.1 ± 0.1	194	5.2 ± 0.0	315
Навоз 100 т/га	6.2 ± 0.6	195	3.4 ± 0.2	210	5.6 ± 0.2	339
НСП _{0.95}	0.94		0.95		0.97	

При минеральной системе удобрения наибольшая биомасса ботвы сахарной свеклы была получена при дозе N2P2K2, а урожай корнеплодов в варианте с тройной дозой. Во второй год опыта с кукурузой самой эффективной была доза N3P3K3. Дальнейшее увеличение дозы минеральных удобрений давало достоверно меньшую прибавку. В отличие от вариантов с минеральными удобрениями, при органической системе удобрения самую высокую продуктивность культур обеспечивала доза из расчета 100 т/га, что было эквивалентно 360 кг/га азота минеральных удобрений. В среднем, по дозам органических удобрений урожай корнеплодов сахарной свеклы и биомассы кукурузы оказался примерно на 10 и 41% соответственно ниже, чем при применении минеральных удобрений.

3.1.2. ИЗМЕНЕНИЯ ВАЛОВОГО СОДЕРЖАНИЯ ОРГАНИЧЕСКОГО ВЕЩЕСТВА В ПОЧВЕ ПРИ СИСТЕМАТИЧЕСКОМ ПРИМЕНЕНИИ МИНЕРАЛЬНЫХ И ОРГАНИЧЕСКИХ УДОБРЕНИЙ

В пахотной почве, как правило, содержится меньше $C_{орг}$, чем в почве того же типа естественных угодий [Орлов, Бирюкова, 1995; Орлов и др., 1996; Полякова, 2008; Сорокина, Когут, 1997; Schnitzer et al, 2006]. Обобщение результатов экспериментов продолжительностью от 2 до 56 лет, выполненных в 137 разных мест мира, показало, что применение минеральных азотных удобрений в 79% случаев способствовало увеличению содержания $C_{орг}$ в почве, в 15% случаев – снижало и в 6% – не изменяло $C_{орг}$ [Alvarez, 2005]. Если надземные растительные остатки удалялись, применяемые дозы удобрений были избыточными для возделываемых растений, либо содержание $C_{орг}$ достигало предельного для данного типа почвы уровня, применение азотных удобрений не вело к накоплению ОВ в почве [Alvarez, 2005; Christopher, Lal, 2007]. В то же время имеется много экспериментальных примеров снижения содержания ОВ в разных почвах под действием минеральных удобрений [Гомонова, Минеев, 2012; Кузьменко, 2010; Мерзлая и др., 2012; Шевцова и др., 2012]. Дело в том, что растительные остатки, корневой опад и ризодепозиты, поступление которых в почву возрастает при внесении минеральных удобрений, становятся причиной развития прайминг-эффекта из-за чего количество включившегося в ПОВ углерода растительных остатков зачастую не компенсирует возросшие минерализационные потери самого ПОВ [Семенов, Ходжаева, 2006].

Применение органических удобрений в умеренных дозах сдерживает дегумусирование пахотных почв, а в повышенных дозах – способствует стабильному и существенному приросту содержания ОВ в почве [Литвинский и др., 2010; Мерзлая и др., 2010; Минеев и др., 1993; Чеботарев и др., 2009; Когут и др., 2011; Шарков, Данилова, 2010; Шарков, 2011; Уваров,

Карабутов, 2012; Edmeades, 2003]. Устойчивый прирост содержания $C_{орг}$ в почве обеспечивается при органо-минеральной системе удобрений [Кузьменко, 2010; Мерзлая и др., 2012; Кузнецов и др., 2007; Лапа и др., 2009; Минакова и др., 2011]. Внося органические удобрения с целью создания в почве определенного запаса доступного микроорганизмам субстрата, необходимого также для агрегации и других физико-химических процессов, важно избегать перенасыщения почвы органическим углеродом, поскольку его избыток быстро теряется в ходе минерализации [West, Six, 2007].

Согласно полученным в наших исследованиях данным содержание валового органического углерода ($C_{орг}$) в почве залежей варьировало от 1.4 до 2.2%, а в пахотной почве с разными системами удобрения – от 1.2 до 2.1% от массы почвы (табл. 8). Серая лесная почва с органической системой удобрения практически не отличалась от залежи по содержанию ОВ, относясь к среднегумусированному классу [Когут, 2012], а при минеральной и органо-минеральной системе удобрения – к минимальному или слабогумусированному уровню с содержанием $C_{орг}$ в 1.1-1.7 раз меньше, чем под залежью.

Двухлетнее применение минеральных удобрений в наших исследованиях не отразилось на содержании валового ОВ в почве (табл. 9). Различия между вариантами с возрастающими дозами минеральных удобрений не превышали стандартного отклонения между повторениями. Накоплению ОВ в почве способствовало ежегодное внесение органических удобрений: содержание $C_{орг}$ после первого года опыта возросло относительно исходного на 0.11-0.31%, а за два года – на 0.20-0.57% от массы почвы. Если между дозами минеральных удобрений и содержанием в почве $C_{орг}$ не было достоверной зависимости ни в первый, ни во второй год опыта, то повышение дозы органических удобрений сопровождалось линейным увеличением содержания $C_{орг}$ (рис. 7).

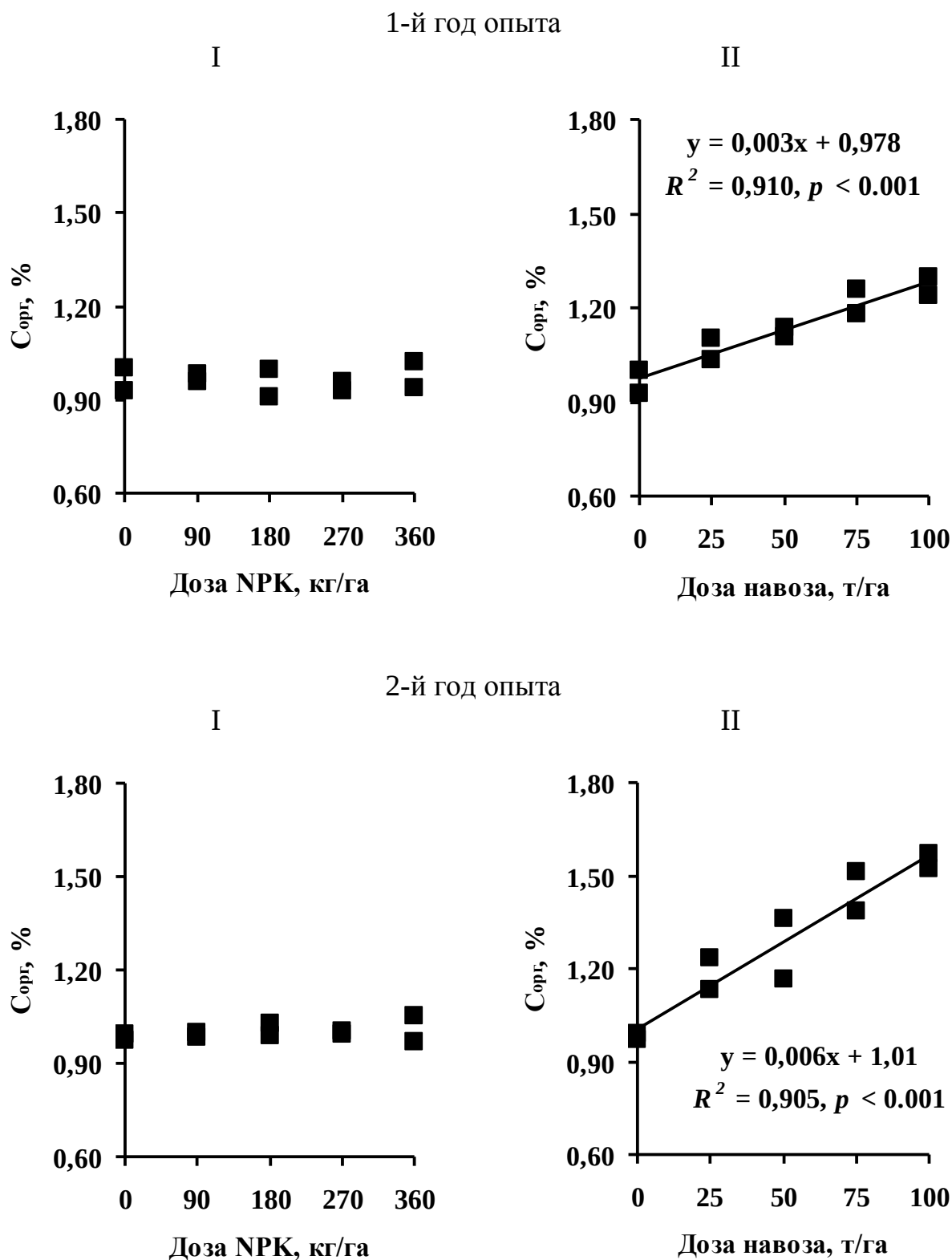


Рис.7. Зависимость содержания в почве валового ($C_{орг}$) органического вещества от возрастающих доз минеральных (I) и органических (II) удобрений.

Прирост $C_{\text{орг}}$ от увеличения дозы навоза с 75 до 100 т/га составил в 1-й год опыта 0.05%, а во второй – 0.10% от массы почвы, что по сравнению с контролем составляло за один год 0.31%, а за два года – 0.57%. Почти одинаковое увеличение $C_{\text{орг}}$ от максимальной дозы навоза в первый и второй год опыта указывает на отсутствие эффекта насыщения серой лесной почвы органических углеродом в результате двухлетнего применения органических удобрений в высоких дозах.

Как показано выше, применение минеральных удобрений может повысить содержание $C_{\text{орг}}$ в почве, но только в долгосрочной перспективе и при условии систематического и полного поступления растительных остатков в почву [Шарков, Данилова, 2010; Alvarez, 2005]. Поэтому полученные нами величины прироста органического вещества в серой лесной почве от 0.08 до 1.6 тонн $C_{\text{орг}}$ на 1 тонну азота минеральных удобрений следует рассматривать как предварительные (табл. 11). По другим данным дополнительное накопление $C_{\text{орг}}$ по сравнению с неудобренными вариантами составляло 2 т/га на каждую тонну азота удобрений [Alvarez, 2005].

Таблица 11. Удельные величины изменения содержания в почве валового органического вещества при разных системах удобрения

Система удобрения	Прирост валового $C_{\text{орг}}$ на 1 т внесенного азота, % от массы почвы	
	После 1-го года	После 2-го года
Минеральная	0.004	0.080
Органическая	<u>0.88</u>	<u>1.60</u>
	0.003	0.006

Примечание: Под чертой – на 1 т свежего навоза КРС

Более быстрый и существенный эффект обеспечивают органические удобрения. Увеличение дозы навоза на 1 т сопровождается ростом содержания $C_{\text{орг}}$ в почве на 0.003-0.006% от массы почвы, что эквивалентно 0.88-1.60% на 1 тонну азота, внесенного с навозом. Увеличение содержания ОВ в почве за короткий срок после внесения органических удобрений

связано с особенностями минерализационных процессов: наиболее доступные микроорганизмам компоненты навоза минерализуются, а грубодисперсные и отмершие растительные остатки накапливаются в виде детрита [Переверзев и др., 2009].

Таким образом, органическая система удобрения с ежегодным внесением свежего навоза КРС в дозе 25 т/га обеспечивает воспроизводство почвенного органического вещества с тенденцией постепенного его накопления, а внесение навоза в дозах от 75 до 100 т/га позволяет оперативно повысить гумусированность почвы с современного ниже минимального уровня до слабогумусированного уровня.

3.1.3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Применение удобрений – обязательное условие оптимизации питательного режима серой лесной почвы. Органическая система удобрений в большей мере направлена на повышение потенциального плодородия почвы, а минеральная система на увеличение ее актуального плодородия, превосходя органическую систему по прибавке урожая возделываемых культур. При органической системе удобрения по сравнению с минеральной системой создается более сбалансированное состояние агрохимических свойств почвы: при близкой для обеих систем средней обеспеченности подвижными формами фосфора и калия почва с органической системой не содержит избытка минеральных форм азота и характеризуется более благоприятной для культур реакцией среды. Наиболее принципиальные различия между системами удобрения проявляются по действию на почвенное органическое вещество. Применение органической системы удобрения позволяет поддерживать гумусированность почвы на уровне залежи, что в 1.1-1.7 раз больше, чем в почве с минеральной системой. Двухлетнее применение органических удобрений в мелиоративных дозах повышало содержание $C_{орг}$ в серой лесной почве в 1.5-1.6 раза, но не приводило к насыщению почвы органическим углеродом.

3.2. УРОВНИ СОДЕРЖАНИЯ АКТИВНОГО ОРГАНИЧЕСКОГО ВЕЩЕСТВА В СЕРОЙ ЛЕСНОЙ ПОЧВЕ

Биологические свойства почвы и их краткосрочная динамика сопряжены с биологически активным пулом почвенного органического вещества (ПОВ). Активный пул ПОВ эквивалентен минерализуемому за вегетационный период количеству органического вещества (ОВ) и представлен компонентами высокого энергетического и питательного статуса, интенсивно используемыми почвенными микроорганизмами и выступающими основным источником биофильных элементов, потребляемых растениями в течение вегетации [Семенов, Тулина, 2011]. Быстро оборачиваемые, со временем существования от менее 3-х до 10 компоненты ОВ наиболее значимы для формирования питательного режима почвы и поддержания микробной активности. Активное ОВ индикатор биологического качества ПОВ – его способности быть источником питания и энергии почвенным микроорганизмам, и является чувствительным индикатором ранних изменений количества и качества ПОВ под действием природных и антропогенных факторов. Считается, что поддержание определенного уровня содержания активного ОВ в почве является обязательным условием сохранения и воспроизводства запасов ПОВ [Романенков и др., 2009; Романенков, 2011; Шарков, 2011; Шарков, Данилова, 2010]. Согласно предыдущим исследованиям, содержание активного ОВ в почвах естественных угодий варьирует от 1.8 до 11.7% от Сорг, а используемые в сельскохозяйственном производстве почвы, за исключением отдельных вариантов, содержат в 1.8-2.1 раза меньше активного ОВ по сравнению с необрабатываемыми землями [Семенов, Тулина, 2011]. Максимальный уровень содержания валового ОВ в дерново-подзолистой почве (залежь), в черноземе типичном и выщелоченном (целинная степь и залежь, соответственно) превышал минимальный уровень, свойственный чистому бессменному пару, в 1.5-2.2 раза, тогда как активного (потенциально-минерализуемого) ОВ – в 4.3-5.1 раза [Семенов и др., 2013]. Менее известными

остаются вопросы влияния разных систем удобрения на активную часть ОВ серой лесной почвы.

3.2.1. ВЛИЯНИЕ МИНЕРАЛЬНОЙ, ОРГАНО-МИНЕРАЛЬНОЙ И ОРГАНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ НА СОДЕРЖАНИЕ АКТИВНОГО ОРГАНИЧЕСКОГО ВЕЩЕСТВА В ПОЧВЕ

Содержание активного (потенциально-минерализуемого, C_0) ОВ в залежной серой лесной почве в весенний и осенний сроки отбора проб составляло 87-163 и 88-165 мг/100 г соответственно (приложения 1-8). В почве под сельскохозяйственными культурами с разными системами удобрения содержание C_0 варьировало от 42 до 109 в весенний отбор и от 41 до 97 мг/100 г в осенний отбор. В среднем для двух сроков отбора проб в пахотной серой лесной почве с разными системами удобрения содержалось 69 мг/100 г активного ОВ, что было в 1.8 раза меньше, чем в почве под залежью (табл. 12). Константа минерализации активного ОВ колебалась в пределах от 0.019 до 0.053 сут⁻¹ (приложения 1-8), составляя в среднем 0.033 сут⁻¹ без какой-либо отчетливой зависимости от системы удобрения (табл. 12).

На долю C_0 в пахотной почве приходилось в среднем 3.8-5.7% от $C_{орг}$, а в почве залежей – 5.6-8.5%. Среди пахотных земель наибольшим содержанием C_0 характеризовалась почва с органической системой удобрения, уровень обеспеченности которой был меньше по сравнению с залежной почвой всего лишь 1.2 раза. Самое низкое содержание активного ОВ было в почве с выращиванием овощных культур и картофеля по методу Миттлайдера, составив в 2.1 раза меньше, чем под залежью. Как известно, особенностью этого метода является размещение культур на грядах, применение только минеральных удобрений в повышенных дозах, которые вносятся в почву гряд, и наличие незанятых растениями, неудобренных и регулярно пропалываемых междурядий. Если различия по содержанию $C_{орг}$ в почве гряд (1.30 ± 0.29 и $1.24 \pm 0.10\%$ в весенний и осенний отбор

соответственно) и междурядий (1.40 ± 0.22 и $1.43 \pm 0.14\%$) были в пределах ошибки, то количество C_0 в почве ряд было достоверно ниже, чем в почве междурядий (табл. 12). Недавно вовлеченная в производство после длительной залежи почва с минеральной системой и старопахотная почва с органо-минеральной системой удобрения культур занимали промежуточное положение по обеспеченности активным органическим веществом.

Таблица 12. Содержание активного (C_0) органического вещества в почве под залежью и пашней с разными системами удобрения

№	Вариант	Содержание C_0		Константа скорости минерализации, сут^{-1}
		мг/100 г	% от $C_{\text{орг}}$	
1	Залежь (контроль варианту 2)	<u>125 ± 44</u>	<u>6.3 ± 0.6</u>	<u>0.038 ± 0.004</u>
		121 ± 38	6.2 ± 0.3	0.030 ± 0.003
2	Органическая система (среднее для двух полей)	<u>96 ± 15</u>	<u>5.7 ± 1.6</u>	<u>0.036 ± 0.007</u>
		88 ± 9	4.3 ± 0.8	0.039 ± 0.011
3	Залежь (контроль варианту 4)	<u>126 ± 11</u>	<u>5.9 ± 1.3</u>	<u>0.041 ± 0.002</u>
		140 ± 30	6.7 ± 1.5	0.029 ± 0.006
4	Минеральная система (среднее для трех полей)	<u>68 ± 2</u>	<u>4.3 ± 0.1</u>	<u>0.043 ± 0.001</u>
		67 ± 1	4.2 ± 0.2	0.033 ± 0.001
5	Залежь (контроль вариантам 6 и 7)	<u>86 ± 1</u>	<u>6.3 ± 0.1</u>	<u>0.036 ± 0.001</u>
		$112 \pm 2^*$	5.6 ± 0.1	0.035 ± 0.001
6	Минеральная система по Миттлайдеру, ряды (среднее для четырех полей)	<u>48 ± 5</u>	<u>3.8 ± 0.8</u>	<u>0.036 ± 0.007</u>
		47 ± 4	3.8 ± 0.3	0.023 ± 0.003
7	То же (междурядья)	<u>63 ± 6</u>	<u>4.6 ± 0.3</u>	<u>0.045 ± 0.006</u>
		66 ± 7	4.7 ± 0.4	0.023 ± 0.002
8	Залежь (контроль варианту 9)	<u>132 ± 5</u>	<u>7.9 ± 1.1</u>	<u>0.027 ± 0.001</u>
		144 ± 12	<u>8.5 ± 1.5</u>	0.021 ± 0.002
9	Органо-минеральная система (среднее для трех полей)	<u>67 ± 8</u>	<u>5.1 ± 0.7</u>	<u>0.035 ± 0.002</u>
		76 ± 8	5.5 ± 1.0	0.025 ± 0.004

Примечания. Над чертой – весенний отбор, под чертой – осенний отбор

* Разница средних весеннего и осеннего отборов существенна по $t_{0.5}$ -критерию.

В других исследованиях содержание C_0 в дерново-подзолистой почве с ежегодным внесением навоза из расчета 20 т/га было существенно выше, чем в почве без удобрений, а с минеральной системой удобрения было меньше, чем с органо-минеральной [Семенов и др., 2013]. Было показано, что существенное обогащение дерново-подзолистой почвы активным ОВ обеспечивало систематическое внесение соломы зерновых и зернобобовых культур. В условиях типичного чернозема внесение минеральных удобрений и применение их на фоне органических удобрений повышало содержание C_0 по сравнению с чистым паром в 1.5 и 2.0 раза соответственно, а самое высокое содержание C_0 в выщелоченном черноземе было в варианте с бессменной пшеницей с полным возвратом в почву всей побочной продукции.

Содержание активного ОВ в почве на момент начала инкубации образцов имело тесную корреляцию с количеством выделившегося за 160 суток $C-CO_2$ ($r = 0.995$, $p < 10^{-4}$), но было меньше в среднем на 14% (приложения 1-8). Экстра-минерализация ПОВ в размере до 15% к C_0 обнаруживалась и при длительной инкубации образцов дерново-подзолистой почвы, типичного и выщелоченного чернозема естественных угодий, бессменного чистого пара и разноудобренных посевов [Семенов и др., 2013]. По соотношению фактически минерализованного ОВ к потенциально-минерализуемому можно судить о направленности превращения ОВ в почве. Если размеры фактической минерализации выше содержания C_0 , то физико-химические и биологические свойства почв, как и условия инкубации, более благоприятны для минерализации ОВ, чем для его стабилизации и приобретения защищенного состояния. Причины и пути стабилизации ОВ в почве рассмотрены в обзоре [Семенов и др., 2009].

Содержание C_0 в почве достоверно коррелировало с $C_{орг}$ ($r = 0.695$, $p < 10^{-4}$). Однако агрогенное обеднение пахотных почв активным ОВ более существенно, чем валовым $C_{орг}$. Если содержание валового $C_{орг}$ в пахотных почвах в среднем было в 1.2 раза меньше, чем под залежами, то активного C_0 – в 1.8 раза. Из полученного уравнения регрессии следует, что по мере

увеличения содержания $C_{орг}$ в серой лесной почве на 500 мг/100 г (0.5% от массы почвы) содержание C_0 возрастает не менее чем на 31 мг/100 г (рис. 8).

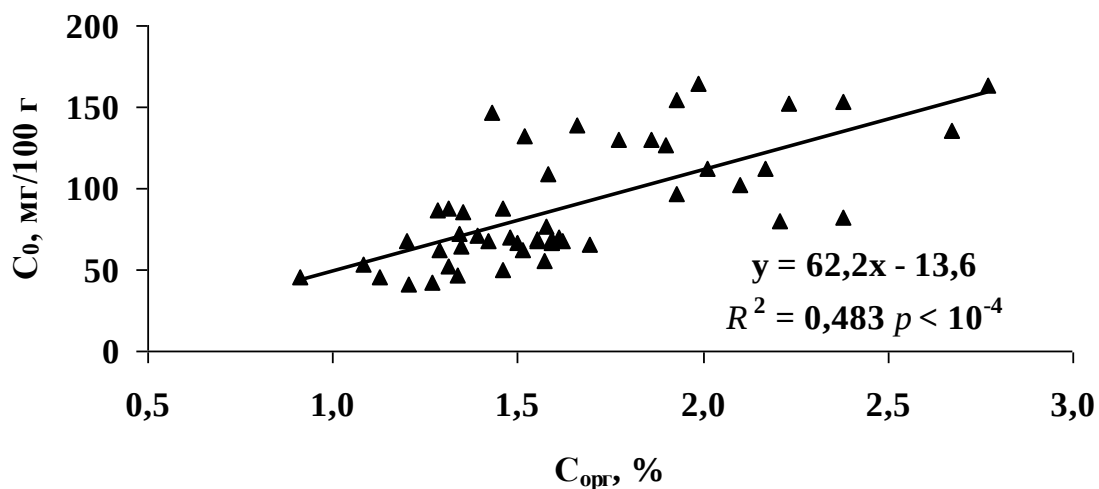


Рис. 8. Изменение обеспеченности серой лесной почвы активным органическим веществом в зависимости от валового ($C_{орг}$) его содержания.

Таким образом, использование органической системы удобрения позволяет поддерживать обеспеченность серой лесной почвы активным органическим веществом на уровне близком залежным землям. Самое низкое содержание активного органического вещества обнаруживалось в почве гряд, сформированных при возделывании культур по методу Миттлайдера с интенсивным применением минеральных удобрений. Рекомендуемые при органо-минеральной системе нормы органических удобрений и способы их применения один раз в несколько лет не устраняют дефицита активного органического вещества в серой лесной почве.

3.2.2. ВЛИЯНИЕ ВОЗРАСТАЮЩИХ ДОЗ МИНЕРАЛЬНЫХ И ОРГАНИЧЕСКИХ УДОБРЕНИЙ НА ОБЕСПЕЧЕННОСТЬ ПОЧВЫ АКТИВНЫМ ОРГАНИЧЕСКИМ ВЕЩЕСТВОМ

В настоящее время неизвестно, каким изменениям подвержено активное органическое вещество (ОВ) в условиях внесения возрастающих доз минеральных и органических удобрений, что затрудняет разработку способов по его воспроизводству в пахотных почвах. В первый год в

условиях микрополевого опыта активный пул (C_0) в серой лесной почве составлял 5.8-10.4% от валового $C_{орг}$, а во второй год – 4.6-11.1% (табл. 13).

Таблица 13. Содержание в почве активного органического вещества (C_0) при применении возрастающих доз минеральных и органических удобрений

Вариант	1-й год опыта			2-й год опыта		
	Содержание C_0		Константа скорости минерализации, сут ⁻¹	Содержание C_0		Константа скорости минерализации, сут ⁻¹
	мг/100 г	% от $C_{орг}$		мг/100 г	% от $C_{орг}$	
Чистый пар	56 ± 1	6.1	0.027±0.000	43 ± 1	4.6	0.029±0.000
Без удобрений (контроль)	56 ± 1	5.8	0.027±0.001	48 ± 0	4.9	0.030±0.000
N1P1K1	59 ± 1	6.1	0.022±0.000	56 ± 0	5.7	0.029±0.001
N2P2K2	61 ± 2	6.4	0.019±0.001	53 ± 0	5.2	0.026±0.000
N3P3K3	62 ± 2	6.5	0.018±0.000	54 ± 1	5.4	0.028±0.000
N4P4K4	65 ± 1	6.6	0.015±0.000	53 ± 1	5.3	0.028±0.000
Навоз 25 т/га	75 ± 1	7.0	0.021±0.000	80 ± 1	6.7	0.025±0.000
То же 50 т/га	92 ± 4	8.2	0.021±0.000	114 ± 4	9.0	0.024±0.000
То же 75 т/га	106 ± 2	8.7	0.022±0.000	133 ± 1	9.2	0.027±0.000
То же 100 т/га	132 ± 3	10.4	0.023±0.000	171 ± 3	11.1	0.028±0.000

В почве чистого пара и варианта без удобрений содержание C_0 после второго года опыта уменьшилось в 1.3 и 1.2 раза соответственно. Применение повышенных доз минеральных удобрений также вызывало уменьшение содержания C_0 в почве в 1.1-1.2 раза по сравнению с первым годом. В противоположность этим вариантам внесение органических удобрений способствовало обогащению почвы активным ОВ по сравнению с первым годом в 1.1-1.3 раза. Поэтому во второй год в вариантах чистого пара, без удобрений и с минеральными удобрениями доля C_0 в $C_{орг}$

снижалась, а при применении органических удобрений – возрастала. Если в первый год опыта под действием возрастающих доз минеральных удобрений наблюдалось небольшое, но достоверное увеличение содержания C_0 в почве, то во второй – влияние доз NPK было не существенным (рис. 9).

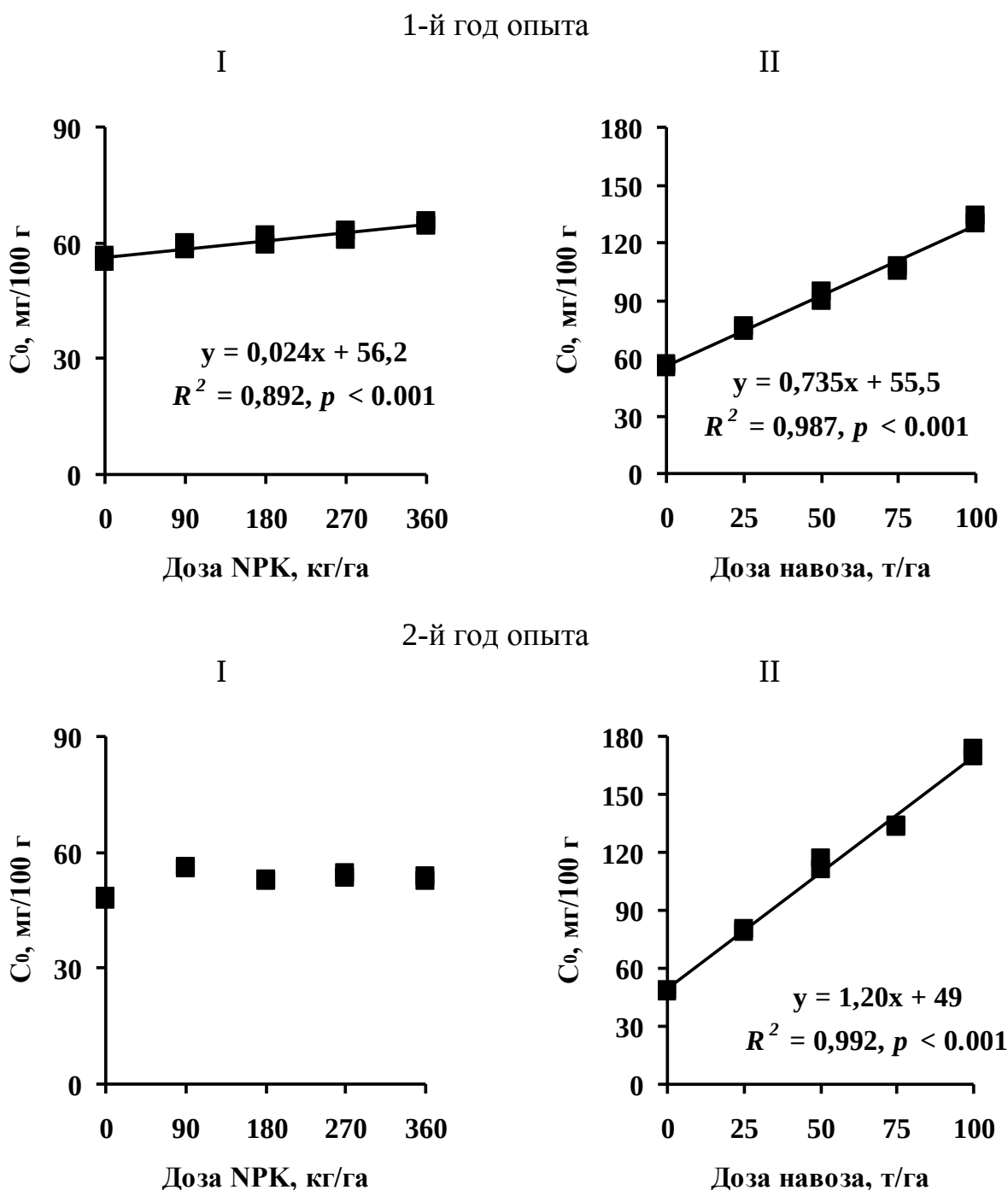


Рис. 9. Зависимость содержания в почве активного (C_0) органического вещества от возрастающих доз минеральных (I) и органических (II) удобрений.

Эффект от минеральных удобрений в первый год опыта мог быть обусловлен присутствием в почве некоторого запаса слабо стабилизированного ОВ, накопленного за время нахождения почвы в залежи, который мобилизовался химическим путем под действием минеральных удобрений, а также особенностями ризодепозитов сахарной свеклы. Линейная зависимость роста содержания C_0 в почве от количества внесенного навоза связана с прямым поступлением разлагаемого ОВ и микробной биомассы, что в свою очередь стимулировало активность почвенного сообщества и минерализационную способность самого ПОВ. Можно заметить, что при внесении навоза в течение двух лет не происходило насыщения серой лесной почвы активным ОВ. В первый год опыта содержание C_0 в почве от дозы 100 т/га увеличилось по сравнению с дозой 25 т/га в 1.8 раза, а во второй год – в 2.1 раза.

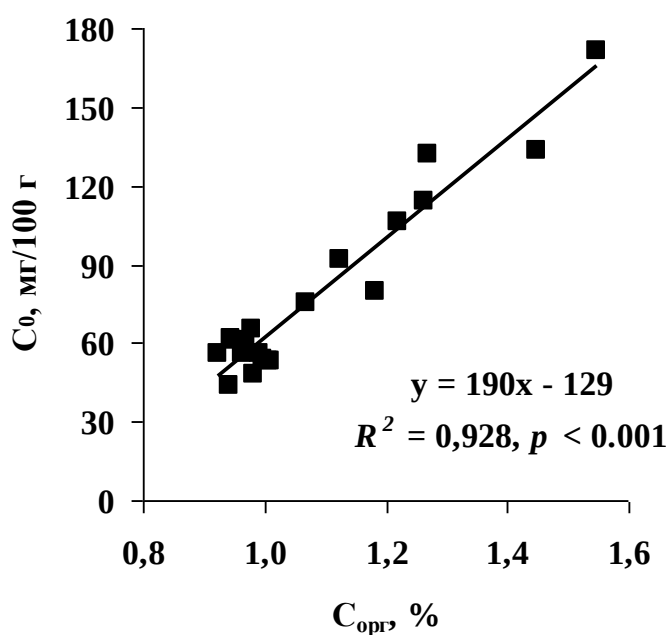


Рис. 10. Зависимость содержаний активного (C_0 , y) и валового (C_{org} , x) органического вещества в почве с применением возрастающих доз минеральных и органических удобрений

Ни в первый, ни во второй год опыта при применении минеральных удобрений не было зависимости между C_{org} и C_0 , тогда как в вариантах с органическими удобрениями обнаруживалась тесная корреляция (соответственно $r = 0.934$, $p < 0.001$ и $r = 0.948$, $p < 0.001$). В целом опыту,

чем больше валового $C_{орг}$ было в почве, тем выше была ее обеспеченность потенциально-минерализуемым углеродом (рис. 10). Исходя из представленной на рис. 10 зависимости следует, что повышение содержания в серой лесной почве валового $C_{орг}$ на 0.5% от массы за счет внесения органических удобрений может дать дополнительно 95 мг/100 г активного ОВ, что позволит достичь уровня, свойственного почве под залежью (табл. 12).

Можно заметить, что краткосрочный прирост содержания активного ОВ в почве от быстрого увеличения содержания $C_{орг}$, достигаемого применением органических удобрений в мелиоративных дозах, в 3 раза больше, чем от постепенного и долговременного повышения $C_{орг}$ за счет использования общепринятых систем удобрения или перевода пахотных земель в залежь. Как видно из данных табл. 14, обогащение серой лесной почвы активным ОВ на 1 т азота навоза было более чем в 8 раз больше, чем на 1 т азота минеральных удобрений после первого года и в 23 раза после второго года опыта.

Таблица 14. Удельные величины изменения содержания в почве активного органического вещества при разных системах удобрения

Система удобрения	Прирост активного ОВ на 1 т внесенного азота, мг/100 г	
	После 1-го года	После 2-го года
Минеральная	26	15
Органическая	<u>216</u> 0.76	<u>350</u> 1.23

Примечание: Под чертой – на 1 т свежего навоза КРС

Как следует из полученных зависимостей, чтобы повысить содержание валового и активного ОВ в почве соответственно на 0.5% от массы почвы и на 95 мг/100 г нужно одноразово внести около 80 т/га свежего навоза КРС.

Содержание активного ОВ в почве вариантов с внесением возрастающих доз минеральных удобрений не коррелировало с величиной

прибавки урожая сахарной свеклы и кукурузы. В вариантах с органическими удобрениями, наоборот, увеличение обеспеченности почвы активным ОВ сопровождалось ростом прибавки урожая ($r = 0.905$, $p < 0.001$).

Таким образом, применение минеральных удобрений может способствовать повышению обеспеченности почвы активным ОВ, но их эффект краткосрочен и слабо выражен. Существенное увеличение содержания в почве активного ОВ дают мелиоративные дозы органических удобрений.

3.2.3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При прогнозировании уровней содержания в почве ОВ и разработке практических мер по его воспроизводству следует исходить из того, что только часть валового органического вещества почвы является биологически активным, т.е. способным к минерализации и быть источником питания и энергии для почвенных микроорганизмов. Характерное при традиционной системе земледелия агрогенное обеднение почвы органическим веществом происходит преимущественно за счет биологически активных его компонентов. Существенное снижение содержания активного органического вещества в почве вызывает использование минеральной системы удобрения культур, возделываемых по методу Миттлайдера. Использование органо-минеральной системы удобрения препятствует прогрессирующей убыли активного органического вещества. Оперативное увеличение доли активного органического вещества достигается переходом на органическую систему удобрения, а коренное – путем перевода пахотных земель в залежь или их залужения. Ежегодное внесение минеральных удобрений сопровождается снижением удельной величины прироста активного органического вещества в почве, а органических удобрений – увеличением. Необходимо продолжение исследований с целью определения продолжительности и объемов поступления в почву органических удобрений без превышения порога насыщения почвы активным органическим веществом.

3.3. СТРУКТУРА АКТИВНОГО ПУЛА ОРГАНИЧЕСКОГО ВЕЩЕСТВА СЕРОЙ ЛЕСНОЙ ПОЧВЫ

Активный пул почвенного органического вещества (ПОВ) включает в себя доступные микроорганизмам фрагменты свежих остатков растений, животных и микробной биомассы, свободные и связанные в гуминовые вещества индивидуальные соединения, которые в большей или в меньшей мере соответствуют фракциям растворенного, дисперсного, макроорганического, «легкого», окисляемого органического вещества (ОВ) [Семенов и др., 2009]. Разложение присутствующих в почве органических субстратов осуществляется одновременно, но с разной скоростью. В зависимости от химической сложности и исходной прочности органические субстраты условно подразделяются на быстро (аминокислоты, белки, моносахара, органические кислоты), умеренно (целлюлоза, гемицеллюлоза, аминсахара) и медленно (лигнин, меланин, полифенолы, гуминовые кислоты) разлагаемые [Орлов, Бирюкова, 1998; Семенов и др., 2004]. Константа скорости минерализации разных органических веществ и материалов уменьшается в следующем ряду (сут^{-1}): глюкоза (0.242) > цистеин (0.185) > биомасса бактерий (0.164) > солома пшеницы (0.060) > целлюлоза (0.044) > торф (0.028) > лигнин (меланин) (0.018) > гуминовая кислота (0.003) [Семенов и др., 2005]. Однако в условиях гетерогенной почвенной среды даже простые и быстро разлагаемые субстраты могут быть защищены от разложения вследствие позиционной недоступности или наличия физических барьеров. С другой стороны, сложные и медленно разлагаемые вещества, как например лигнин, содержат в себе быстро разлагаемые компоненты, утилизация которых микроорганизмами может совпадать по времени с освоением быстроразлагаемых соединений. Поэтому разнокачественность ПОВ создается не только составом и долей простых и сложных или исходно прочных и лабильных соединений, но и соотношением защищенных и не защищенных субстратов. Определение динамики эмиссии $\text{C-}\text{CO}_2$ с количественным учетом его потерь позволяет получить представление о

структуре активного пула ПОВ – соотношению легко (C_1 , $k_1 > 0.1 \text{ сут}^{-1}$), умеренно (C_2 , $0.1 < k_2 > 0.01 \text{ сут}^{-1}$) и трудно (C_3 , $0.01 < k_3 > 0.001 \text{ сут}^{-1}$) минерализуемых компонентов, отличающихся по скорости минерализации на порядок [Семенов, Тулина, 2011]].

3.3.1. ОСОБЕННОСТИ СТРУКТУРЫ АКТИВНОГО ПУЛА ОРГАНИЧЕСКОГО ВЕЩЕСТВА ПРИ РАЗНЫХ СИСТЕМАХ УДОБРЕНИЯ

Динамика выделения $C\text{-CO}_2$ из почвы является количественным и качественным индикатором освоения микроорганизмами органических субстратов разной сложности, прочности и защищенности. Характерной особенностью динамики разложения и минерализации ПОВ является интенсивное выделение $C\text{-CO}_2$ в начале инкубации с постепенным замедлением в последующие недели (рис. 11 и 12, приложение 9).

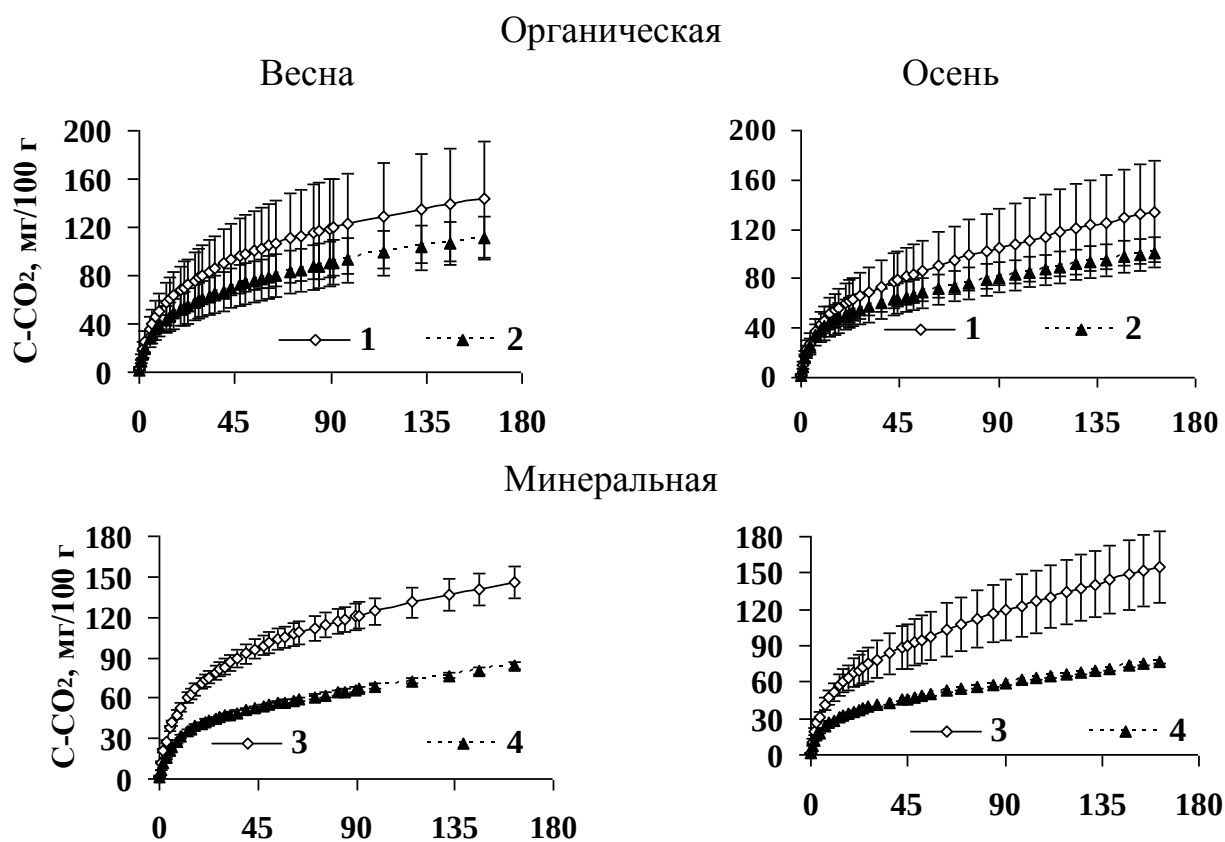
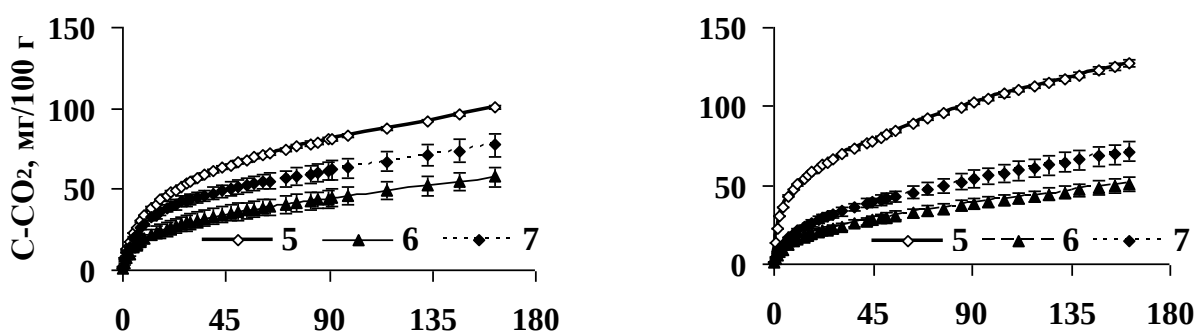


Рис. 11. Динамика кумулятивного продуцирования $C\text{-CO}_2$ почвой под залежью и пашней с разными системами удобрения. Залежь – 1, 3. Пашня – 2, 4. Подробное описание вариантов 1-4 приведено в табл. 4-5.

Минеральная по Миттлайдеру



Органо-минеральная

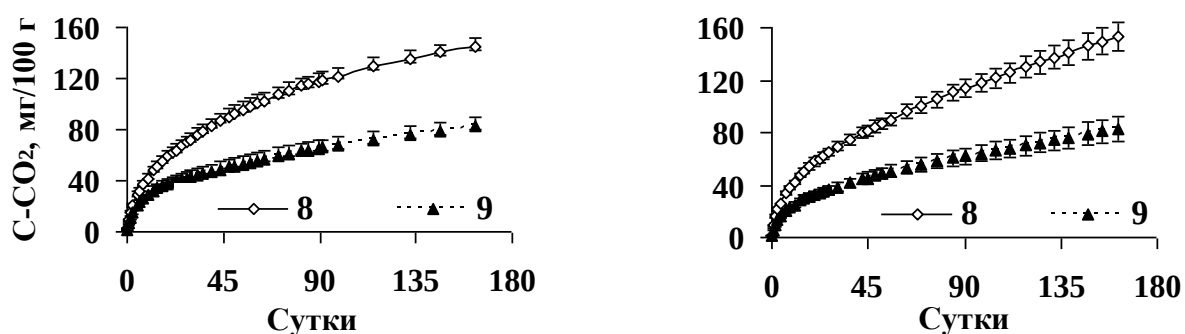


Рис. 12. Динамика кумулятивного продуцирования $C-CO_2$ почвой под залежью и пашней с разными системами удобрения. Залежь – 5, 8. Пашня – 6 (гряды), 7 (межгрядья), 9. Подробное описание вариантов 5-9 приведено в табл. 6-7.

Прогревание почвы с последующим ее увлажнением оказывает стрессовое действие на почвенное микробное сообщество, вызывая частичное отмирание и лизис микробной биомассы, либо выброс цитоплазматических соединений выжившими клетками, в результате чего образуется запас легко минерализуемого ПОВ, который используется новой генерацией почвенных микроорганизмов с характерным увеличением интенсивности дыхания. По мере утилизации легко минерализуемых веществ, интенсивность выделения $C-CO_2$ постепенно снижается с сохранением особенностей его продукции между разными вариантами почв, отличающимися по валовому содержанию и качественному составу активного пула ПОВ. Аппроксимация кривых кумулятивных величин продуцирования $C-CO_2$ почвой позволяет разделить активный пул ПОВ на две или три фракции, отличающиеся по скорости минерализации.

Результаты исследований показали, что в активном пуле ПОВ залежных земель идентифицировались три фракции: легко минерализуемая со временем полного обновления ($T = 1/k$) в течение 2-4 сут, умеренно минерализуемая с $T = 13-29$ сут и трудно минерализуемая с $T = 166-500$ сут. (табл. 15).

Таблица 15. Структура активного пула органического вещества серой лесной почвы под залежью и пашней с разными системами удобрения

№ п/п	Легко минерализуемая (C ₁)		Умеренно минерализуемая (C ₂)		Трудно минерализуемая (C ₃)	
	мг/ 100 г	$k_1, \text{сут}^{-1}$	мг/ 100 г	$k_2, \text{сут}^{-1}$	мг/ 100 г	$k_3, \text{сут}^{-1}$
1	<u>33±8</u>	<u>0.285±0.044</u>	<u>47±22</u>	<u>0.041±0.007</u>	<u>121±31</u>	<u>0.005±0.000</u>
	28±2	0.330±0.088	27±9	0.059±0.028	176±31*	0.005±0.004
2	<u>22±3</u>	<u>0.348±0.032</u>	<u>28±5*</u>	<u>0.059±0.021</u>	<u>132±45</u>	<u>0.005±0.003</u>
	35±13	0.280±0.064	14±2	0.046±0.006	136±15	0.003±0.001
3	<u>30±2</u>	<u>0.357±0.012</u>	<u>49±4*</u>	<u>0.051±0.003</u>	<u>142±16</u>	<u>0.004±0.001</u>
	29±3	0.346±0.056	33±17	0.070±0.001	269±76*	0.003±0.001
4	<u>35±2*</u>	<u>0.167±0.009</u>	Нет	Нет	<u>87±11*</u>	<u>0.005±0.001</u>
	27±1	0.242±0.005			76±3	0.006±0.001
5	<u>18±0</u>	<u>0.357±0.006</u>	<u>35±1*</u>	<u>0.052±0.002</u>	<u>155±23</u>	<u>0.002±0.000</u>
	36±0*	0.428±0.002	14±2	0.076±0.011	124±8	0.006±0.001
6	<u>20±5*</u>	<u>0.190±0.038</u>	Нет	Нет	<u>59±7</u>	<u>0.006±0.001</u>
	14±2	0.221±0.021			61±10	0.006±0.001
7	<u>32±3*</u>	<u>0.166±0.018</u>	Нет	Нет	<u>71±8</u>	<u>0.006±0.001</u>
	18±1	0.200±0.019			82±11*	0.006±0.001
8	<u>24±1*</u>	<u>0.329±0.027</u>	<u>43±2*</u>	<u>0.035±0.004</u>	<u>125±4</u>	<u>0.006±0.001</u>
	18±2	0.477±0.091	31±5	0.072±0.007	263±68*	0.003±0.001
9	<u>28±1*</u>	<u>0.218±0.034</u>	Нет	Нет	<u>82±6</u>	<u>0.007±0.000</u>
	21±2	0.253±0.020			91±17	0.007±0.001

Номера вариантов: Залежь – 1, 3, 5, 8. Пашня – 2, 4, 6 (гряды), 7 (межгрядья), 9. Подробное описание вариантов 1-9 приведено в табл. 4-7.

Над чертой – весенний отбор, под чертой – осенний отбор.

*Разница средних весеннего и осеннего отборов существенна по $t_{0.5}$ -критерию.

Система применения удобрений оказывала влияние на качество ПОВ, изменяя соотношения фракций в активном пуле. В пахотной почве с

органической системой удобрения, как и в почве залежей, выделялись все три фракции активного пула, тогда как в почвах с органо-минеральной и минеральной системой удобрения определялись только легко ($T = 4-6$ сут) и трудно ($T = 143-200$ сут) минерализуемые фракции. Еще одна особенность влияния системы удобрения на структуру активного пула ОВ в почве состоит в существенном снижении при минеральной и органо-минеральной системах содержания трудно минерализуемой фракции по сравнению с залежью. Если при органической системе удобрения в трудно минерализуемой фракции содержалось в 1.1 раза меньше, чем в условиях залежи, то при минеральной и органо-минеральной системах – в 1.8-2.5 раза.

Имеется, по меньшей мере, две причины утраты умеренно минерализуемой фракции в активном пуле ОВ пахотной почвы. Во-первых, судя по константе скорости минерализации умеренно минерализуемой фракции ОВ ($0.1 < k_2 > 0.01 \text{ сут}^{-1}$), основным его источником является так называемое «макроорганическое вещество», к которому относят химически неизмененное, неокклюдированное и незащищенное от микробного разложения ОВ с размером частиц >2000 мкм [Gregorich et al, 2006]. Макроорганическое вещество служит одновременно субстратом и местом расселения для почвенных микроорганизмов. Недостаточное и тем более нерегулярное поступление свежего органического материала, стимулирование его разложения за счет внесения элементов минерального питания с удобрениями и механических обработок приводят к быстрому израсходованию макроорганического вещества в пахотной почве. Интенсивное применение минеральных удобрений без внесения компенсационных доз органических материалов ограничивает рост микробной биомассы, что также может быть причиной утраты умеренно минерализуемой фракции в активном пуле ПОВ.

Другая причина – это низкая доля в пахотных почвах крупных структурных отдельностей, в которых, как правило, аккумулируется макроорганическое вещество. Ранее было показано [Семенов и др., 2010], что

в пахотной серой лесной почве активный пул ОВ структурно-агрегатных отдельностей размером 10-5 мм был представлен легко и умеренно минерализуемыми фракциями, тогда как в более тонких структурах – преимущественно легко и трудно минерализуемыми.

В целом содержание легко минерализуемой фракции C_1 варьировало от 14 до 36, умеренно минерализуемой (C_2) – от 14 до 49, а трудно минерализуемой (C_3) – от 59 до 269 мг/100 г (табл. 15). Сумма $C_1 + C_2 + C_3$ или $C_1 + C_3$ фракций, как правило больше величины активного пула (C_0), поскольку включает обмен углерода между фракциями в течение инкубации. Хотя содержание легко минерализуемой (C_1) фракции в активном пуле ПОВ было в 2.6-12.9 раз меньше (8-25% от активного пула), чем трудно минерализуемой (C_3) фракции (69-74% от активного пула), ее потенциальная углеродминерализационная активность ($УА = C_1 \cdot k_1$) превышала активность C_3 фракции ($C_3 \cdot k_3$) в 8.7-19.9 раз. Соответственно углеродминерализующая активность C_2 фракции была 2.0-4.4 раза выше, чем C_3 фракции.

Таким образом, использование традиционных разновидностей минеральной и органо-минеральной систем удобрения приводит к изменению соотношений между легко, умеренно и трудно минерализуемыми фракциями, отличающимися по константе скорости минерализации на порядок, с упрощением структуры активного пула из-за утраты умеренно минерализуемой фракции.

3.3.2. ИЗМЕНЕНИЕ СТРУКТУРЫ АКТИВНОГО ПУЛА ОРГАНИЧЕСКОГО ВЕЩЕСТВА ПРИ ВНЕСЕНИИ ВОЗРАСТАЮЩИХ ДОЗ МИНЕРАЛЬНЫХ И ОРГАНИЧЕСКИХ УДОБРЕНИЙ

Внесение возрастающих доз минеральных и органических удобрений по-разному влияло на качественный состав активного пула ОВ серой лесной почвы, что наглядно видно из динамики кумулятивного продуцирования C - CO_2 почвой. В вариантах чистого пара, без удобрений и с внесением минеральных удобрений достаточно интенсивное выделение C - CO_2 со

скоростью больше 1 мг/100 г в сут происходило в течение 6-10 суток, тогда как в вариантах органическими удобрениями в зависимости от дозы – на протяжении 15-48 суток (рис. 13, Приложение 10 и 11).

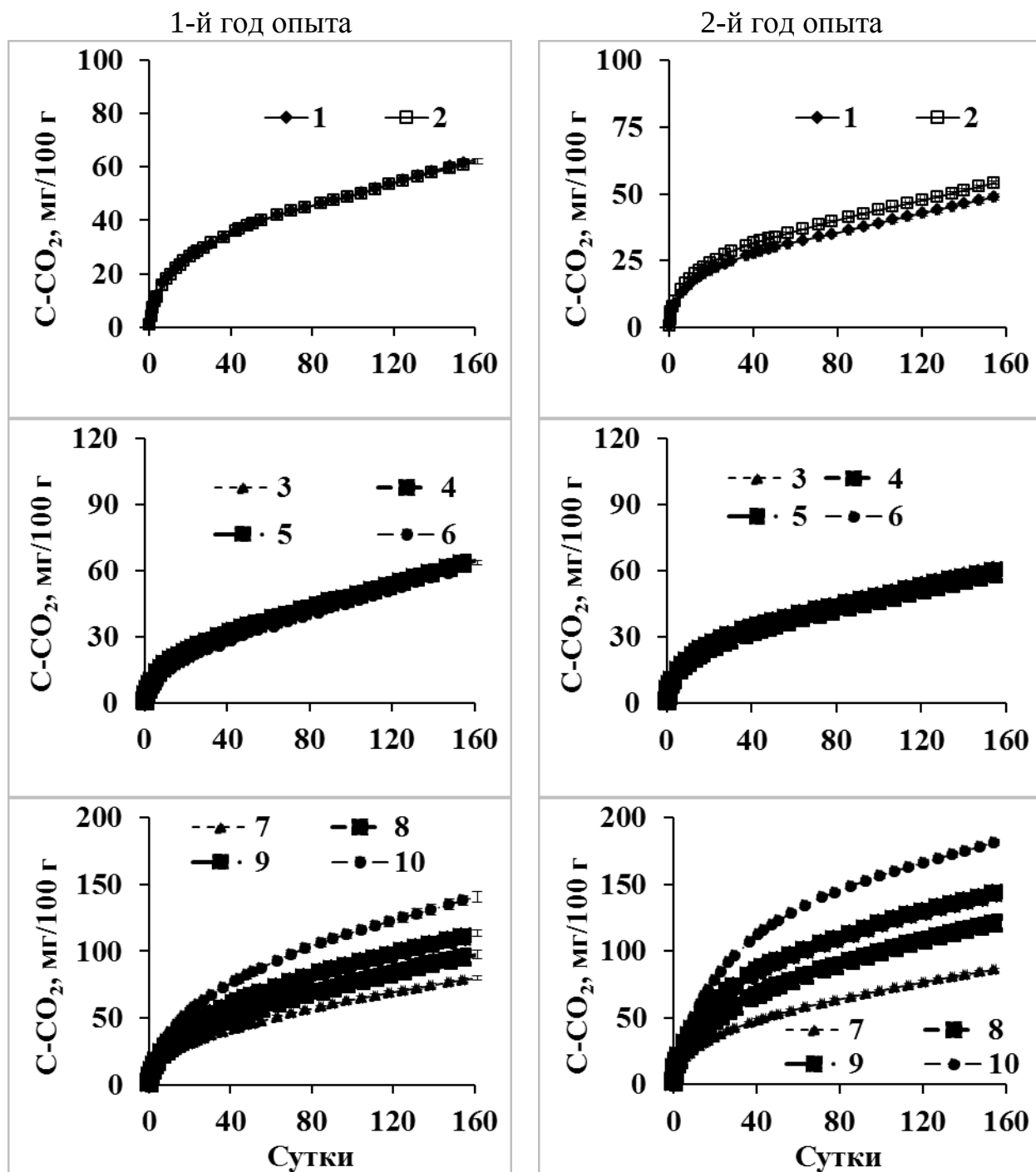


Рис. 13. Кумулятивное продуцирование $C-CO_2$ серой лесной почвой в течение длительной ее инкубации. Варианты: 1 – Чистый пар, 2 – Без удобрений (контроль), 3 – (NPK)1, 4 – (NPK)2, 5 – (NPK)3, 6 – (NPK)4, 7 – Навоз 25 т/га, 8 – Навоз 50 т/га, 9 – Навоз 75 т/га, 10 – Навоз 100 т/га.

И в первый, и во второй год опыта в почве чистого пара, неудобренного контроля и с минеральной системой удобрения определялись только легко ($T = 4-6$ сут) и трудно ($T = 143-500$ сут) минерализуемые фракции (табл. 16).

Таблица 16. Структура активного пула органического вещества серой лесной почвы при применении возрастающих доз минеральных и органических удобрений

№ п/п*	Фракции**					
	Легко минерализуемая (C ₁)		Умеренно минерализуемая (C ₂)		Трудно минерализуемая (C ₃)	
	мг/ 100 г	k_1 , сут ⁻¹	мг/ 100 г	k_2 , сут ⁻¹	мг/ 100 г	k_3 , сут ⁻¹
1	<u>20±0</u>	<u>0.184±0.001</u>	Нет		<u>68±3</u>	<u>0.006±0.001</u>
	16±0	0.234±0.007			55±1	0.006±0.000
2	<u>20±1</u>	<u>0.164±0.009</u>	Нет		<u>63±5</u>	<u>0.007±0.001</u>
	18±0	0.212±0.007			55±1	0.007±0.000
3	<u>19±0</u>	<u>0.160±0.002</u>	Нет		<u>99±2</u>	<u>0.004±0.000</u>
	19±1	0.229±0.016			65±2	0.007±0.001
4	<u>17±0</u>	<u>0.166±0.005</u>	Нет		<u>131±2</u>	<u>0.003±0.000</u>
	17±0	0.260±0.008			64±0	0.006±0.000
5	<u>16±0</u>	<u>0.165±0.009</u>	Нет		<u>148±9</u>	<u>0.002±0.000</u>
	19±1	0.192±0.009			66±3	0.006±0.000
6	<u>15±1</u>	<u>0.167±0.014</u>	Нет		<u>175±19</u>	<u>0.002±0.000</u>
	20±1	0.183±0.014			71±2	0.005±0.000
7	<u>13±1</u>	<u>0.391±0.010</u>	<u>9±2</u>	<u>0.078±0.002</u>	<u>100±5</u>	<u>0.005±0.000</u>
	11±0	0.868±0.005	22±2	0.062±0.003	134±9	0.003±0.000
8	<u>17±0</u>	<u>0.354±0.003</u>	<u>20±2</u>	<u>0.040±0.002</u>	<u>134±18</u>	<u>0.002±0.000</u>
	14±1	0.668±0.096	33±0	0.055±0.007	167±10	0.004±0.001
9	<u>13±0</u>	<u>0.407±0.004</u>	<u>29±0</u>	<u>0.054±0.002</u>	<u>173±6</u>	<u>0.003±0.000</u>
	13±0	0.769±0.002	53±0	0.054±0.000	182±2	0.004±0.000
10	<u>18±2</u>	<u>0.401±0.049</u>	<u>34±1</u>	<u>0.053±0.011</u>	<u>167±8</u>	<u>0.005±0.001</u>
	11±0	0.986±0.10	87±0	0.048±0.001	185±8	0.004±0.000

* 1 – Чистый пар, 2 – Без удобрений (контроль), 3 – (NPK)1, 4 – (NPK)2, 5 – (NPK)3, 6 – (NPK)4, 7 – Навоз 25 т/га, 8 – Навоз 50 т/га, 9 – Навоз 75 т/га, 10 – Навоз 100 т/га.

** Над чертой – 1-й год опыта, под чертой – 2-й год опыта

В отличие от вариантов чистого пара, неудобренного контроля и с внесением минеральных удобрений в активном пуле ПОВ вариантов с органической системой удобрения идентифицировались три фракции: легко минерализуемая со временем полного обновления ($T = 1/k$) в течение 1-3 сут, умеренно минерализуемая с $T = 13-25$ сут и трудно минерализуемая с $T = 200-500$ суток. Следовательно, внесение органических удобрений устраняет свойственные пахотным почвам нарушения качественного состава ПОВ, делая его более разнообразным и полноценным, при этом, чем выше доза органического удобрения и продолжительнее их применение, тем более выраженными были положительные изменения в активном пуле. В других исследованиях при систематическом внесении соломы и навоза не происходило деградации активного пула, и в его составе идентифицированы все три фракции как в дерново-подзолистой почве, так и в типичном черноземе [Семенов и др., 2013].

Содержание легко минерализуемой C_1 фракции в активном пуле ПОВ было примерно одинаковым во всех вариантах опыта, как в первый так и во второй год опыта, составляя 11-20 мг/100 г (табл. 16). Особенностью стало изменение во второй год опыта состава легко минерализуемой фракции, что отразилось на константах скорости минерализации, значения которых в почве без удобрений и с минеральными удобрениями увеличились в 1.1-1.3 раза, а с органическими удобрениями в 1.9-2.5 раза. Как уже отмечено выше, внесение органических удобрений приводит к обогащению активного пула компонентами, формирующими умеренно минерализуемую фракцию, которая утрачивается в пахотной почве без удобрений и с минеральной системой удобрения. Во второй год внесения органических удобрений содержание умеренно минерализуемой фракции увеличилось в 1.7-2.6 раза. Если в первый год опыта доля легко минерализуемой фракции в активном пуле составляла 7-16%, то после повторного внесения во второй год опыта – 13-31% от суммы всех фракций.

Доминирует в структуре активного пула почвенного органического вещества трудно минерализуемая C_3 фракция, содержание которой по мере увеличения дозы минеральных и органических удобрений возрастало в первый год опыта в 1.6-2.8 раза. Во второй год опыта в почве без удобрений и с минеральными удобрениями содержание C_3 фракции уменьшилось в 1.1-2.5 раза, тогда как под действием двухлетнего внесения органических удобрений, наоборот, дополнительно увеличилось в 1.1-1.3 раза (табл. 16). Увеличение трудно минерализуемой фракции под действием минеральных удобрений происходило, по-видимому, в результате химической мобилизации ПОВ минеральными удобрениями. Солюбилизирующее действие на ПОВ проявляется при изменении pH, увеличении концентрации почвенного раствора, а также в очагах повышенной концентрации аммиака [Haynes, Naidu, 1998]. Во второй год мобилизирующее действие минеральных удобрений, даже в вариантах с экстремально высокими дозами, было мало заметным. Можно предположить, минеральные удобрения мобилизуют лишь некоторое количество ПОВ, и в случае его израсходования мобилизующий эффект удобрений не проявляется. При внесении органических удобрений увеличение содержания трудно минерализуемой фракции было вызвано, наоборот, поступлением органических веществ с навозом. Можно заметить, что чем сильнее увеличивалось под действием доз минеральных удобрений содержание углерода в трудно минерализуемой фракции в первый год опыта, тем существеннее была его убыль после второго года опыта. На фоне N1P1K1 и N4P4K4 содержание C_3 фракции увеличилось по сравнению с контролем в 1.6 и 2.8 раза, соответственно, а после второго года уменьшилось в 1.5 и 2.5 раза относительно первого года опыта.

В вариантах с возрастающими дозами минеральных удобрений содержание C_1+C_2 и C_3 фракций не коррелировало с величиной прибавки урожая сахарной свеклы и кукурузы. Наоборот, при применении органических удобрений прирост содержания C_1+C_2 и C_3 фракций

сопровождался ростом прибавки урожая ($r = 0.936$, $p < 0.001$ и $r = 0.845$, $p = 0.002$, соответственно).

Таким образом, интенсивное применение минеральных удобрений, обеспечивая существенную прибавку урожая культур, несет угрозу ухудшения качества почвенного органического вещества и требует регулярной компенсации утрачиваемых фракций активного пула свежим органическим материалом. При применении органических удобрений прибавка урожая несколько ниже, чем при минеральной системе, но поддерживается сбалансированное соотношение между легко, умеренно и трудно минерализуемыми фракциями активного пула.

3.3.3 ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Агрогенное обеднение почвы органическим веществом по сравнению с залежными почвами происходит преимущественно за счет активных, наиболее доступных микроорганизмам, компонентов (фракций). Применение минеральных удобрений сопровождается упрощением структуры активного пула почвенного органического вещества вследствие утраты умеренно минерализуемой фракции ($0.1 < k_2 > 0.01 \text{ сут}^{-1}$), компоненты которой минерализуются и перераспределяются между легко и трудно минерализуемыми фракциями, а также мобилизации некоторого количества трудно минерализуемой фракции, которое в дальнейшем подвергается минерализации, теряясь из почвы. Рекомендуемые при органо-минеральной системе нормы органических удобрений и способы их применения один раз в несколько лет не устраняют отмеченных нарушений в структуре активного пула, свойственных старопахотным почвам с минеральной системой удобрения. Ежегодное внесение органических удобрений особенно в повышенных дозах позволяет поддерживать полноценную структуру активного пула почвенного органического вещества, обогащая активный пул легко, умеренно и трудно минерализуемыми компонентами.

3.4. УГЛЕРОДМИНЕРАЛИЗУЮЩАЯ АКТИВНОСТЬ СЕРОЙ ЛЕСНОЙ ПОЧВЫ ПРИ РАЗНЫХ СИСТЕМАХ УДОБРЕНИЯ И ВНЕСЕНИИ ВОЗРАСТАЮЩИХ ДОЗ МИНЕРАЛЬНЫХ И ОРГАНИЧЕСКИХ УДОБРЕНИЙ

При характеристике минерализационного потенциала почвенного органического вещества (ПОВ) важно учитывать не только размер минерализуемого пула, но и активность процесса минерализации, поскольку энергетическое обеспечение почвенных процессов в случае большого, но малоактивного пула нередко слабее, чем меньшего по размеру, но быстро оборачиваемого пула [Janzen, 2006]. Судя по результатам корреляционного анализа данных полученных для массива почв залежных и пахотных участков (табл. 12), величина активного пула (C_0) не коррелировала с константой скорости минерализации (k , сут⁻¹). Интегральное представление о функциональности активного (потенциально-минерализуемого) пула ПОВ можно получить с помощью индекса углеродминерализующей активности (УА), который устанавливается исходя из значений размера пула и скорости минерализации ПОВ ($УА = C_0 \cdot k$, мг/100 г в сутки). Судя по ранее выполненным исследованиям, индекс УА отчетливо отображал различия между разными почвами и системами удобрения по минерализационной активности [Семенов и др., 2013].

Самые высокие значения индексов УА были свойственны почве залежных участков, а среди обрабатываемых почв – при органической системе удобрения (рис. 14). При органо-минеральной системе удобрения индексы УА в весенний и осенний сроки отбора почвенных проб были в 1.5-1.7 раза меньше, чем под залежью, при минеральной – в 1.7-1.8, а при применении минеральных удобрений в гряды по Миттлайдеру – в 1.8-3.6 раза. В неудобренных междурядьях снижение УА было не столь сильным, чем в грядах.

Следовательно, использование минеральной системы удобрения ведет к уменьшению минерализационной активности почвы. Такой эффект может быть обусловлен несколькими причинами. Во-первых, количество поступающего в

почву свежего органического материала при минеральной системе удобрения не достаточно для поддержания высокой функциональной активности микроорганизмов. Во-вторых, в условиях хорошего обеспечения микроорганизмов элементами питания, вносимыми с минеральными удобрениями, происходит более быстрая утилизация активного органического вещества. В третьих, минеральные удобрения могут инициировать физико-химическую стабилизацию активного органического вещества, путем образования устойчивых комплексов с органическими соединениями. И, в-четвертых, химические соли могут оказывать прямое или косвенное, например, посредством изменения рН среды, отрицательное действие на микробное сообщество.

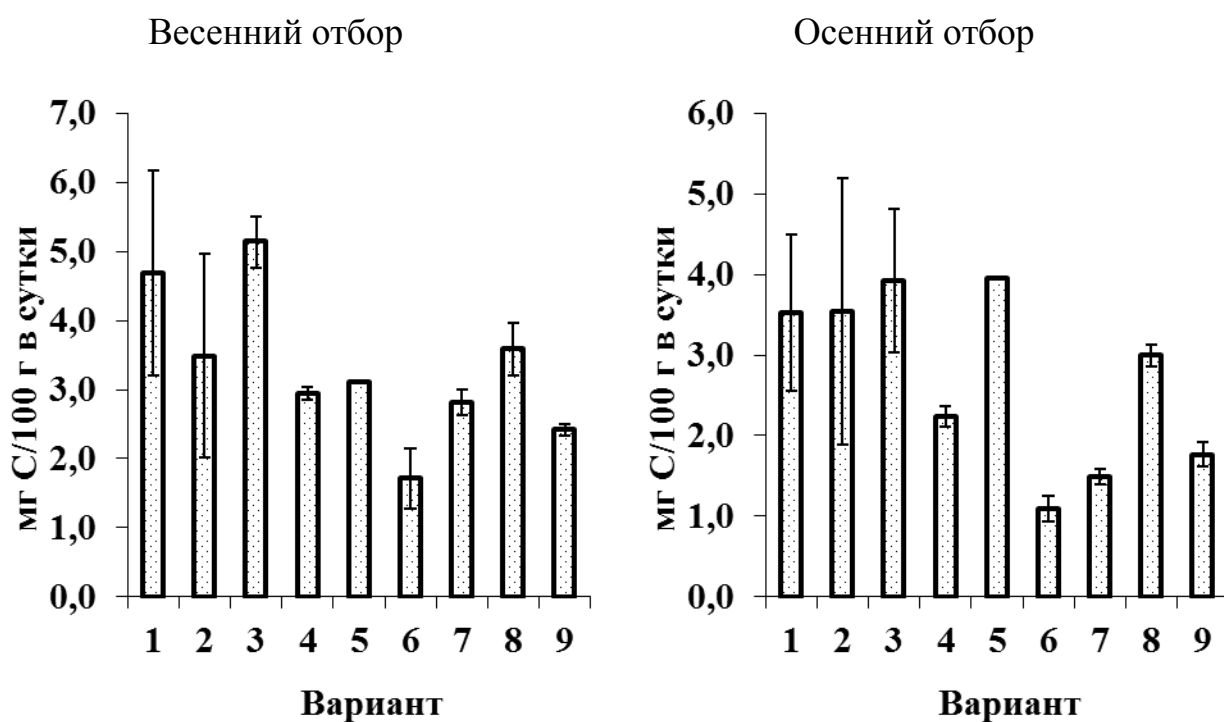


Рис. 14. Углеродминерализующая активность серой лесной почвы под залежью и посевами с разными системами удобрения. Варианты: 1 – Залежь (контроль варианту 2); 2 – Органическая система; 3 – Залежь (контроль варианту 4); 4 – Минеральная система; 5 – Залежь (контроль вариантам 6 и 7); 6 – Минеральная система по Миттлайдеру (гряды); 7 – То же (межгрядья); 8 – Залежь (контроль варианту 9); 9 – Органо-минеральная система.

Более тесная корреляция УА с содержанием C_0 ($r = 0,780$, $p < 10^{-4}$), чем с константами скорости минерализации ($r = 0.456$, $p < 10^{-3}$), свидетельствует о наибольшей значимости первых двух причин. Периодическое обогащение минерализуемого пула органическими удобрениями в случае органической системы удобрения и в меньшей мере при органо-минеральной системе, положительно сказывается на минерализационной активности почвы.

Сравнивая приведенные выше данные с литературными [Семенов и др., 2013], можно заметить, что УА залежной серой лесной почвы (3.87 мг/100 г в сут) выше, чем дерново-подзолистой почвы в залежи, но ниже, чем целинного типичного и залежного выщелоченного чернозема (соответственно 2.67, 7.46 и 9.06 мг/100 г в сут). В дерново-подзолистой почве разнудобренных агроценозов индексы УА составляли 0.78-2.28, в серой лесной почве – 1.09-3.54, в типичном черноземе – 1.30-3.23, а в выщелоченном черноземе – 1.99-4.12 мг/100 г в сут. Наименьшие индексы УА в этом массиве были в вариантах чистого пара и без удобрений, а наибольшие – с применением органических удобрений в виде навоза или соломы.

Исследования в микрополевом опыте были направлены на уточнение закономерностей влияния минеральных и органических удобрений на углеродминерализующую активность (УА) серой лесной почвы. При внесении возрастающих доз минеральных удобрений в первый год опыта УА серой лесной почвы была ниже, чем на контроле и чем выше была доза минеральных удобрений, тем сильнее было подавление минерализационной активности (рис. 15). Во второй год опыта не было установлено какой-либо зависимости индекса УА от доз минеральных удобрений. Для всего исследуемого массива за два года эксперимента индексы УА почвы на 90% зависели от величины активного пула и только на 6% от изменения константы скорости минерализации. Эти данные согласуются с высказанным выше положением (см. глава 3.3.2), что минеральные удобрения, способствуя химической солюбилизации ПОВ, в целом отрицательно действуют на процессы минерализации в почве, стимулируя их только в органических

почвах с C/N шире 20 или при условии поступления растительных остатков с низким содержанием азота. Иная закономерность была свойственна вариантам с органическими удобрениями, применение которых в течение двух лет сопровождалось реальным увеличением минерализационной активности в почве по сравнению с контролем в 1.1-2.0 раза в первый год и в 1.4-3.3 раза во второй год опыта. На рис. 15 видно, что чем больше вносилось органических удобрений, тем существеннее было увеличение индекса УА.

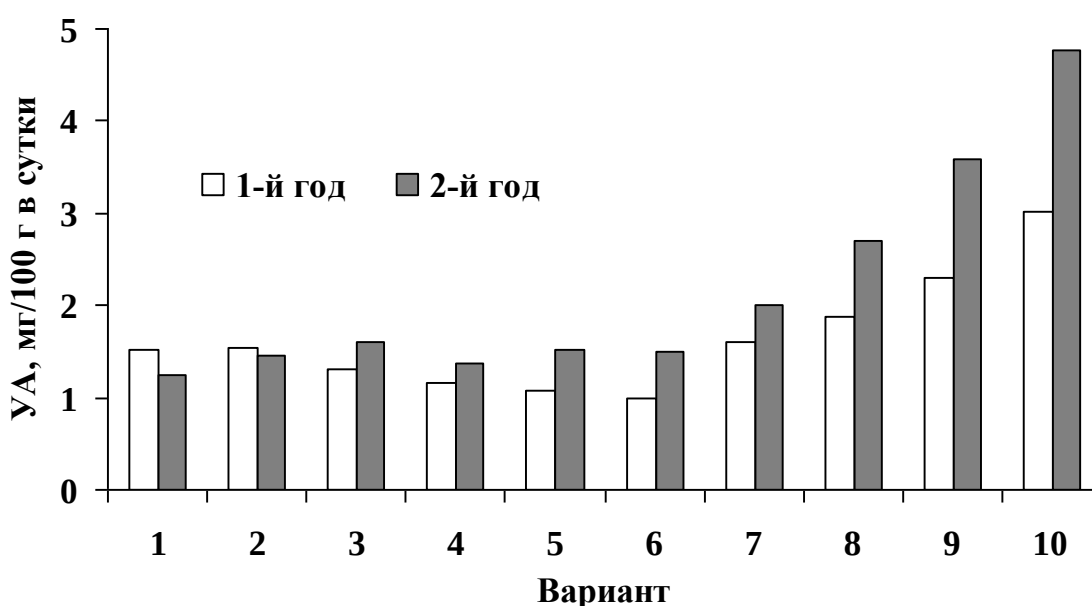


Рис. 15. Изменение углеродминерализующей активности (УА) серой лесной почвы при применении возрастающих доз минеральных и органических удобрений. Номера вариантов: 1 – Чистый пар, 2 – Без удобрений (контроль), 3 – NPK(1), 4 – NPK(2), 5 – NPK(3), 6 – NPK(4), 7 – навоз 25 т/га, 8 – навоз 50 т/га, 9 – навоз 75 т/га, 10 – навоз 100 т/га.

Таким образом, применение экстремально высоких доз минеральных удобрений недопустимо без одновременного обогащения почвы разлагаемым органическим материалом. Даже одноразовое внесение органических удобрений, но в мелиоративных дозах, существенно улучшает минерализационный статус почвенного органического вещества. В целом, применение органической системы удобрений способствует увеличению

углеродминерализующей активности почвы, тем самым обеспечивая ее потенциальное плодородие.

3.4.1. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Минеральные и органические удобрения оказывают принципиально разное влияние на углеродминерализующую активность почвы, величина которой дает интегральное представление о размерах доступного для микроорганизмов субстрата и активности использования этого субстрата микроорганизмами. Углеродминерализующую активность серой лесной почвы под залежью и посевами выше, чем дерново-подзолистой почвы, но ниже чем типичного и выщелоченного чернозема.

Углеродминерализующая активность серой лесной почвы зависит как от характера землепользования, так и от системы удобрения агроценоза, снижаясь в следующей последовательности: залежь > агроценоз с органической системой удобрения > агроценоз с органо-минеральным удобрением > агроценоз с минеральным удобрением. Двухлетнее внесение возрастающих доз минеральных и органических удобрений привело к изменению углеродминерализующей активности почвы в следующем порядке сравниваемых вариантов: навоз 100 т/га > навоз 75 т/га > навоз 50 т/га > навоз 25 т/га > N1P1K1 ≥ N2P2K2 ≥ N3P3K3 ≥ N4P4K4 > без удобрений > чистый пар. Минеральные удобрения, оказывая мобилизирующее действие на трудно минерализуемые компоненты почвенного органического вещества, не стимулировали процессы минерализации в почве. Реальное увеличение углеродминерализующей активности серой лесной почвы обеспечивало применение органических удобрений.

3.5. СООТНОШЕНИЕ ХИМИЧЕСКИ ЭКСТРАГИРУЕМЫХ ФРАКЦИЙ И БИОЛОГИЧЕСКИ АКТИВНОГО ПУЛА В СОСТАВЕ ПОЧВЕННОГО ОРГАНИЧЕСКОГО ВЕЩЕСТВА

Почвенное органическое вещество (ПОВ) не только гетерогенно по составу и химической структуре, но и крайне неравномерно распределено в конгломерате минеральных частиц, взаимодействие с которыми сопровождается образованием органо-минеральных комплексов, микро- и макроагрегатов. Разнообразие индивидуальных органических соединений и механизмов их стабилизации, обуславливает разнокачественность ПОВ и невозможность оценить совокупность его свойств и функций одним аналитическим методом [Семенов и др., 2009; Olk, Gregorich, 2006; von Lützow et al, 2006; von Lützow et al, 2007; von Lützow et al, 2008]. Физические методы (термогравиметрический, гранулометрический, денсиметрический, грануло-денсиметрический, гидрофильно-гидрофобные соотношения и др.) не раскрывают прочности внутренних и внешних химических связей, а химические (определение подвижности системы гумусовых кислот (ГК), тип их фракционного распределения, интенсивность образования и полимеризации ГК, формирование подвижных форм ГК и гуматов) – физической защищенности ПОВ. При этом и химические, и физические методы дают лишь косвенное представление о фактической доступности ПОВ микроорганизмам [Семенов, Тулина, 2011].

Актуальной задачей в исследованиях содержания и качества, состава и функций, накопления и потерь ПОВ является разработка наиболее адекватных методов характеристики пула активного органического вещества почв в разных зональных условиях биологических, физико-химических и водно-физических свойств почв [Когут, 2003; Шевцова, 2009]. Л.К.Шевцова [2009] обращает внимание, что пока не существует надежных методов определения активного гумуса и предлагает в этих целях экстрагировать углерод горячей водой, водной вытяжкой (водорастворимый углерод), 0,1 н.

NaOH (подвижный углерод по Тюрину), нейтральным раствором пирогосфата натрия (лабильный гумус по Дьяконовой) или определять легкоразлагаемое ОВ, извлекаемое тяжелой жидкостью при центрифугировании (метод Ганжары).

Однако легко экстрагируемое, подвижное ОВ, может быть не активным из-за недоступности почвенным микроорганизмам в силу наличия физических барьеров, точно также как легко разлагаемое или легко минерализуемое ОВ не всегда является химически лабильным [Семенов и др., 2009]. Растворимое и высокого питательного статуса, но стабилизированное (защищенное) ОВ может иметь более продолжительное время существования в почве, чем слаборастворимое и исходно прочное, но дестабилизированное нарушающими воздействиями. Например, в 0.1 н. NaOH вытяжке, кроме собственно подвижной фракции, содержатся и относительно стабильные компоненты [Ганжара и др., 2005]. В составе растворенного ОВ содержатся не только простые соединения, но и сложные (аминосахара, фенолы, фульвокислоты, гуминовые кислоты), которые мало доступны микроорганизмам [van Hees et al, 2005]. Чтобы избежать путаницы в интерпретации результатов, полученных при использовании солевой (водной) и щелочной экстракций, солерастворимую фракцию (C_{cp}), содержащую легко подвижную часть ПОВ, можно обозначить «растворенной», а щелочно-экстрагируемую – традиционно, «подвижной» ($C_{подв}$). К «лабильному» ПОВ можно было бы отнести «легкую» фракцию, выделяемую денсиметрическим методом и «дисперсное» ОВ, отделяемое флотацией в гексаметафосфате натрия, а к «активному» (C_0) – потенциально-минерализуемое ОВ, измеряемое по количеству образующегося при инкубации C-CO₂.

В наших исследованиях было исследовано влияние разных систем применения удобрений на пулы растворенного, подвижного и активного органического вещества в серой лесной почве

3.5.1. СООТНОШЕНИЕ РАСТВОРЕННОГО, ПОДВИЖНОГО И АКТИВНОГО ОРГАНИЧЕСКОГО ВЕЩЕСТВА В ПОЧВЕ С РАЗНЫМИ СИСТЕМАМИ УДОБРЕНИЯ

В залежной серой лесной почве на долю извлекаемого 0.1 н. NaOH ($C_{\text{подв}}$) приходилось 17-29% от валового $C_{\text{орг}}$, а в почве под посевами – 11-18% (табл. 17). По доле $C_{\text{подв}}$ в POV исследуемая серая лесная почва была ближе к типичному чернозему с содержанием $C_{\text{орг}}$ 2.8-5.0% [Когут, 2012], чем к легкосуглинистой дерново-подзолистой почве с содержанием $C_{\text{орг}}$ 0.6-0.8% [Шевцова и др., 2012].

Таблица 17. Содержание подвижного ($C_{\text{подв}}$) и растворенного ($C_{\text{ср}}$) органического вещества в почве под залежью и посевами с разными системами удобрения

Вариант	$C_{\text{подв}}$		$C_{\text{ср}}$	
	мг/100 г	% от $C_{\text{орг}}$	мг/100 г	% от $C_{\text{орг}}$
1. Залежь (контроль варианту 2)	344 ± 18	19.2 ± 7.6	$34.0 \pm 0.1^*$	1.9 ± 0.8
	312 ± 40	17.0 ± 3.6	28.6 ± 1.2	1.6 ± 0.4
2. Органическая система	331 ± 85	16.8 ± 2.1	$32.9 \pm 0.8^*$	1.7 ± 0.5
	287 ± 65	13.8 ± 2.1	26.3 ± 1.3	1.3 ± 0.1
3. Залежь (контроль варианту 4)	430 ± 123	19.4 ± 3.4	$34.0 \pm 0.2^*$	1.6 ± 0.3
	371 ± 69	17.8 ± 4.1	26.5 ± 1.6	1.3 ± 0.2
4. Минеральная система	223 ± 60	14.0 ± 3.5	$32.7 \pm 0.3^*$	2.1 ± 0.1
	169 ± 38	10.7 ± 3.0	19.4 ± 1.0	1.2 ± 0.2
5. Залежь (контроль вариантам 6 и 7)	388 ± 40	28.7 ± 2.5	$33.0 \pm 0.3^*$	2.4 ± 0.0
	400 ± 46	20.2 ± 4.6	28.9 ± 0.2	1.4 ± 0.2
6. Минеральная система по Миттлайдеру (гряды)	184 ± 40	14.7 ± 4.4	$31.5 \pm 1.5^*$	2.5 ± 0.5
	215 ± 33	17.4 ± 2.8	19.1 ± 2.4	1.5 ± 0.2
7. То же (межгрядья)	Не опр.	Не опр.	$31.8 \pm 1.0^*$	2.3 ± 0.4
			16.8 ± 2.0	1.2 ± 0.2
8. Залежь (контроль варианту 9)	367 ± 31	22.0 ± 3.7	$31.7 \pm 0.7^*$	1.9 ± 0.2
	$439 \pm 54^*$	25.5 ± 3.3	28.9 ± 2.4	1.8 ± 0.5
9. Органо-минеральная система	219 ± 26	16.0 ± 1.1	$28.8 \pm 1.3^*$	2.1 ± 0.3
	247 ± 20	18.1 ± 2.1	22.9 ± 1.5	1.7 ± 0.3

*Разница между весенним и осенним отборами существенна по $t_{0.5}$ -критерию.
 $\pm$ – стандартное отклонение

В почве с органической системой удобрения содержалось примерно такое же количество $C_{\text{подв}}$, что и под залежью, тогда как при органо-минеральном удобрении – в 1.7-1.8 раз меньше, а при минеральной системе и удобрении по Миттлайдеру – меньше в 1.9-2.2 раза (табл. 17).

Содержание растворенного ($C_{\text{ср}}$) в исследуемой серой лесной почве было в 6-15 раз меньше, чем $C_{\text{подв}}$, составляя всего лишь 1.2-2.5% от валового $C_{\text{орг}}$ (табл. 17). В весенний отбор проб почвы, когда почвенные микроорганизмы недостаточно активны, содержание $C_{\text{ср}}$ в почве разных вариантов было практически одинаковым, а в осенний отбор в пахотной почве содержалось меньше $C_{\text{ср}}$, чем в почве залежей, а при минеральной системе удобрения меньше, чем при органической системе. При экстракции солевым раствором извлекается самая незащищенная и наиболее подвижная фракция ПОВ. Поскольку входящие в эту фракцию органические компоненты непрерывно утилизируются микроорганизмами, экстрагируется лишь неиспользованная часть растворимого ОВ, представленная слабо минерализуемыми компонентами. Известно, что в составе растворимого ОВ содержатся не только простые соединения, но и аминоксахара, фенолы, фульвокислоты и гуминовые кислоты, которые мало доступны микроорганизмам [van Hees et al, 2005]. Минерализация растворимого ОВ четко соответствовала двухфазной динамике, свидетельствуя о наличии легко минерализуемой ($T_{0.5} = 7$ сут) и трудно минерализуемой ($T_{0.5} = 580$ сут) фракций, на которые приходилось 32 и 68% растворимого углерода [Qualls, Bridgham, 2005].

Из сопоставления содержания подвижной и растворенной фракций (табл. 17) с размером активного пула (табл. 12) следует, что только 22-40% подвижного ПОВ могло бы минерализоваться за вегетационный период, а в растворимом состоянии обнаруживалось 19-57% (24-57% в весенний период и 19-32% в осенний) от активного ПОВ. Можно заметить, что различия по содержанию активного ОВ в почвах под залежью и пашней проявлялись

сильнее, чем по $C_{\text{подв}}$ и $C_{\text{орг}}$, указывая на высокую чувствительность этого пула ОВ к агрогенным воздействиям.

Содержания $C_{\text{подв}}$ и $C_{\text{ср}}$ фракций, слабо коррелируя друг с другом ($r = 0.291$, $p = 0.04$), имели более тесную связь с $C_{\text{орг}}$ (соответственно $r = 0.622$, $p < 10^{-4}$ и $r = 0.291$, $p = 0.04$). Из полученных уравнений регрессии следует, что при увеличении содержания $C_{\text{орг}}$ в серой лесной почве на 500 мг/100 г содержание $C_{\text{подв}}$ возрастает на 75, а $C_{\text{ср}}$ – на 2.1 мг/100 г (рис. 16). Соответственно, прирост $C_{\text{подв}}$ на 100 мг/100 г будет сопровождаться ростом содержания C_0 – на 30 мг/100 г, а при увеличении обеспеченности почвы $C_{\text{ср}}$ на 10 мг/100 г содержание C_0 повысится на 23 мг/100 г (рис. 17).

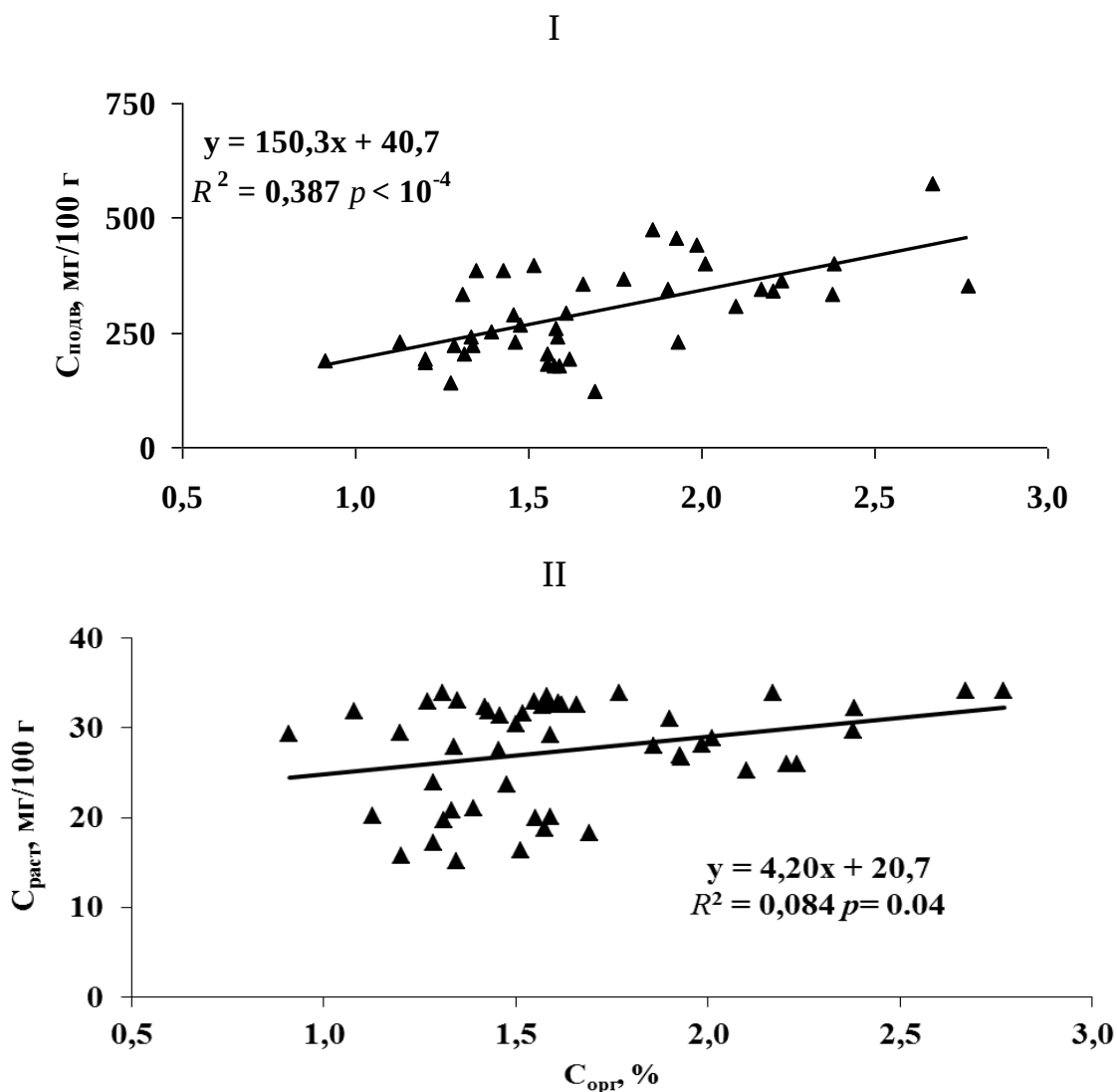


Рис. 16. Изменение обеспеченности серой лесной почвы подвижным (I) и растворенным (II) органическим веществом в зависимости от валового ($C_{\text{орг}}$) содержания.

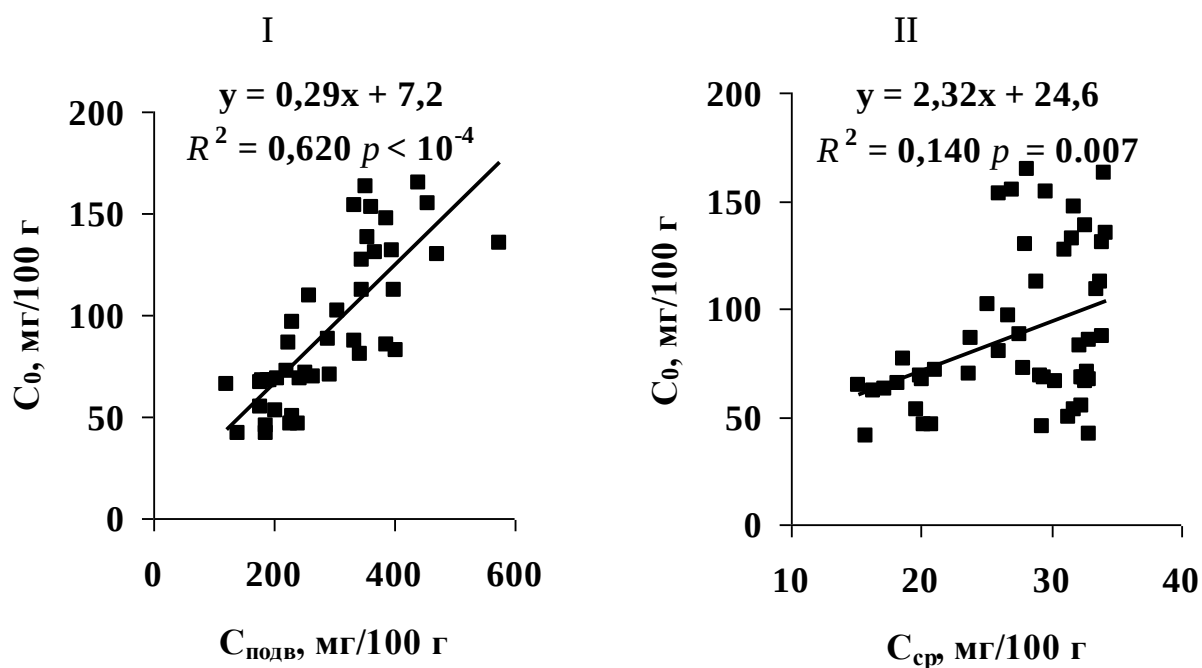


Рис. 17. Изменение содержания активного органического вещества (C_0) в серой лесной почве в зависимости от ее обеспеченности подвижной (I) и растворенной (II) фракциями

Можно заметить, что в растворенном состоянии до инкубации содержалось в среднем по почвам разного землепользования весеннего и осеннего сроков отбора проб почти столько же углерода сколько его обнаруживалось в C_1 фракции (25 ± 7 и 28 ± 6 мг/100 г, соответственно), с достоверной корреляцией ($r = 0.475$, $p < 10^{-3}$) между ними (табл. 15 и 17). При этом $C_{\text{ср}}$ не коррелировал с трудно минерализуемой C_3 фракцией. Наоборот, с C_3 фракцией хорошо коррелировал щелочнорастворимый углерод ($r = 0.686$, $p < 10^{-4}$), содержание которого превышало C_3 фракцию в среднем в 2.3 раза. Между C_1 фракцией активного пула и содержанием $C_{\text{подв}}$ достоверной связи не было. Можно предположить, что при экстракции 0.1 н. NaOH наряду с трудно минерализуемыми компонентами извлекается значительная часть полностью защищенных и потому неактивных соединений.

Таким образом, не все подвижное ПОВ, извлекаемое раствором щелочи, является биологически активным. Значительная его часть представлена, по-видимому, компонентами, которые участвуют в формировании супрамолекулярных структур гуминовых веществ и образуют

медленный пул ПОВ со временем оборота от 3-10 до 100 лет. В то же время, подвижную фракцию допустимо считать ближайшим резервом активного (потенциально-минерализуемого) ОВ. Определение экстрагируемого солевым раствором углерода позволяет установить долю свободного, растворимого и не защищенного ПОВ, способного к быстрой минерализации. Для растворимого ОВ характерно короткое, от нескольких часов до нескольких суток, время полного обновления. Поэтому изменения его содержания в почве происходят быстрее, чем это можно зарегистрировать при традиционных способах отбора почвенных проб и их анализе химическими методами.

3.5.2. ВЛИЯНИЕ ВОЗРАСТАЮЩИХ ДОЗ МИНЕРАЛЬНЫХ И ОРГАНИЧЕСКИХ УДОБРЕНИЙ НА СООТНОШЕНИЕ РАСТВОРЕННОГО, ПОДВИЖНОГО И АКТИВНОГО ОРГАНИЧЕСКОГО ВЕЩЕСТВА В ПОЧВЕ

Растворенное, подвижное и активное ОВ серой лесной почвы демонстрировали разную чувствительность к внесению органических и минеральных удобрений в возрастающих дозах. При внесении органических удобрений в почве содержалось больше подвижного ($C_{\text{подв}}$) углерода, чем при минеральной системе (табл. 18), а увеличение его содержания в первый и второй год опыта в большей мере зависело от возрастающих доз навоза, чем от доз NPK. В целом по опыту обнаруживалась достоверная зависимость между содержанием в почве валового и подвижного углерода, согласно которой повышение содержания $C_{\text{орг}}$ будет сопровождаться увеличением фракции $C_{\text{подв}}$ на 78 мг/100 г (рис. 18). Однако при внесении минеральных удобрений корреляционная связь между $C_{\text{орг}}$ и $C_{\text{подв}}$ была недостоверной, в отличие от вариантов с возрастающими дозами органических удобрений ($r = 0.826, p = 0.003$).

Таблица 18. Содержание в почве подвижного органического углерода ($C_{\text{подв}}$) при применении возрастающих доз минеральных и органических удобрений

Вариант	1-й год опыта		2-й год опыта	
	мг/100 г	% от $C_{\text{орг}}$	мг/100 г	% от $C_{\text{орг}}$
1. Чистый пар	227 ± 3	25	239 ± 20	25
2. Без удобрений (контроль)	246 ± 2	26	248 ± 16	25
3. N1P1K1	252 ± 22	26	259 ± 16	26
4. N2P2K2	267 ± 4	28	288 ± 0	29
5. N3P3K3	285 ± 36	30	281 ± 2	28
6. N4P4K4	289 ± 38	30	311 ± 16	31
7. Навоз 25 т/га	307 ± 51	29	301 ± 36	25
8. То же 50 т/га	314 ± 20	28	308 ± 26	24
9. То же 75 т/га	325 ± 15	27	329 ± 5	23
10. То же 100 т/га	335 ± 10	26	340 ± 10	22

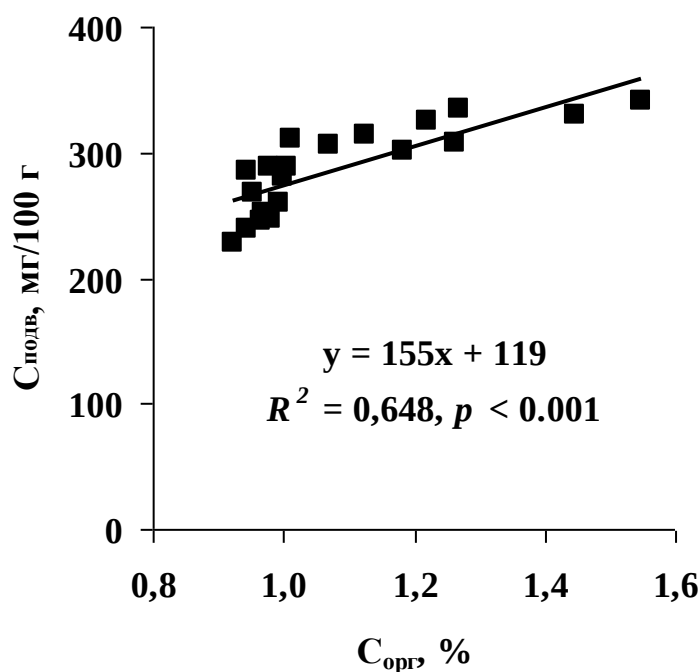


Рис. 18. Зависимость содержаний подвижного ($C_{\text{подв}}$) и валового ($C_{\text{орг}}$) органического вещества в почве с применением возрастающих доз минеральных и органических удобрений.

Рост содержания в почве $C_{\text{подв}}$ без соответствующего прироста валового $C_{\text{орг}}$ при применении повышенных доз минеральных удобрений свидетельствует о мобилизации ПОВ минеральными удобрениями, что

хорошо согласуется с увеличением содержания трудно минерализуемой фракции активного пула в первый год опыта (табл. 16). Наоборот, увеличение содержания $C_{\text{подв}}$ в 1.2-1.4 раза по мере повышения доз органических удобрений было меньше прироста $C_{\text{орг}}$, из-за чего доля $C_{\text{подв}}$ в $C_{\text{орг}}$ снижалась, что указывает на поступление с навозом большого количества малоподвижных компонентов.

В серой лесной почве при внесении возрастающих доз минеральных и органических удобрений содержание $C_{\text{ср}}$ было в 13-16 раз меньше, чем $C_{\text{подв}}$, составляя всего лишь 1.6-2.3% от валового $C_{\text{орг}}$ (табл. 19)

Таблица 19. Содержание в почве растворенного органического углерода ($C_{\text{ср}}$) при применении возрастающих доз минеральных и органических удобрений

Вариант*	1-й год опыта				2-й год опыта			
	мг/100 г	% от $C_{\text{орг}}$	% от $C_{\text{подв}}$	% от C_0	мг/100 г	% от $C_{\text{орг}}$	% от $C_{\text{подв}}$	% от C_0
1	18 ± 2	2.0	8.1	33	15 ± 2	1.6	6.4	35
2	19 ± 1	1.9	7.6	33	16 ± 1	1.6	6.3	33
3	19 ± 1	2.0	7.6	32	16 ± 2	1.7	6.3	29
4	20 ± 1	2.2	7.7	34	17 ± 3	1.7	5.8	32
5	21 ± 2	2.3	7.5	34	18 ± 3	1.8	6.5	34
6	22 ± 1	2.3	7.7	34	19 ± 2	1.9	6.1	36
7	22 ± 2	2.1	7.3	30	20 ± 2	1.7	6.6	25
8	23 ± 4	2.1	7.5	26	24 ± 3	1.9	7.9	21
9	24 ± 3	2.0	7.4	23	25 ± 3	1.7	7.5	19
10	27 ± 1	2.1	8.0	20	25 ± 1	1.6	7.3	14

* Номера вариантов те же, что и в табл. 18

Содержание $C_{\text{ср}}$ в почве достоверно коррелировало как с подвижным, так и с валовым ОВ (рис. 19). Их полученных уравнений следует, что увеличение содержания $C_{\text{орг}}$ на 0.5% от массы почвы может привести к увеличению содержания $C_{\text{раст}}$ на 7.1 мг/100г, а увеличение $C_{\text{подв}}$ на 100 мг/100 г приводит к увеличению $C_{\text{раст}}$ на 2,5 мг/100 г.

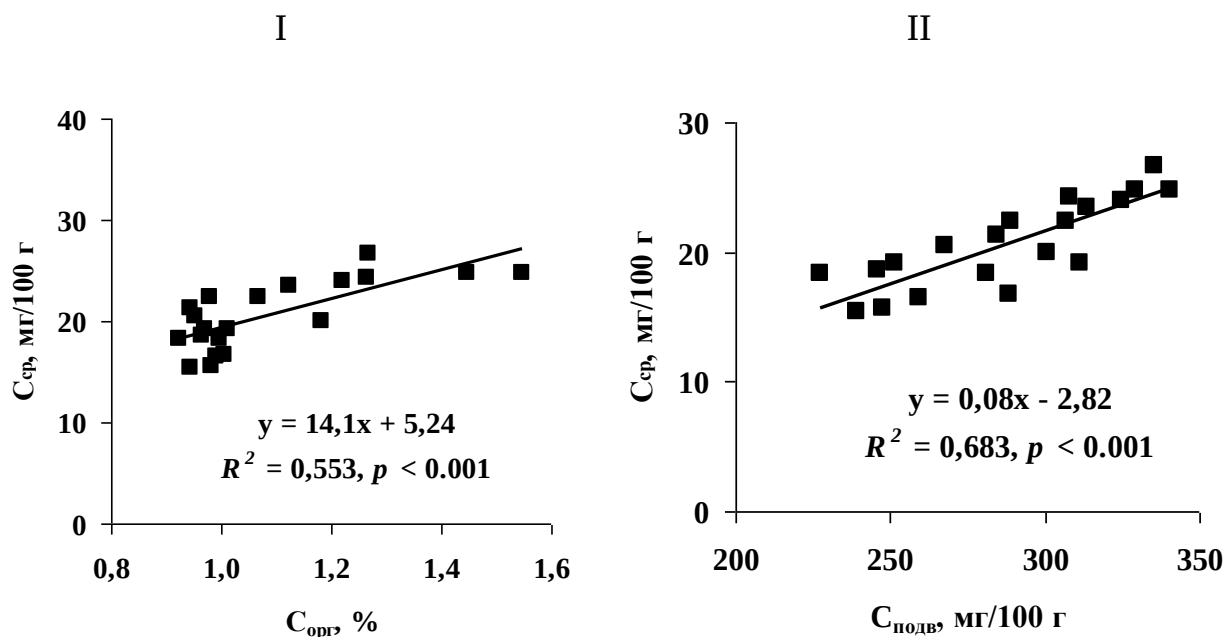


Рис. 19. Зависимость содержания растворенного ($C_{ср}$) органического вещества с валовым ($C_{орг}$) (I) и подвижным ($C_{подв}$) (II) органическим веществом в почве с применением возрастающих доз минеральных и органических удобрений

По отношению к удобренному контролю наибольшее содержание $C_{ср}$ было в вариантах с применением навоза в возрастающих дозах. По мере увеличения дозы навоза содержание $C_{раст}$ увеличивалось в 1.1-1.4 и в 1.2-1.6 раза за первый и второй год соответственно. Это согласуется с результатами опыта [Liang et al, 2012], в котором внесение навоза существенно повысило содержание ОВ растворенной (экстракция горячей водой) и лабильной (диспергирование гексаметафосфатом натрия) фракций, тогда как при минеральной системе удобрения не было повышения ни $C_{орг}$, ни его растворенной и лабильной фракций. В нашем опыте по мере возрастания доз NPK обнаруживалась тенденция увеличения содержания $C_{ср}$ по отношению к контролю, но оно было менее отчетливым, особенно во второй год опыта, чем при возрастающих дозах навоза. В других исследованиях на дерново-подзолистой почве содержание солерастворимого ПОВ в вариантах с

минеральным удобрением возрастало в 1.3 раза, а с органическим – в 1.4-2.7 раза [Орлова и др., 2006].

Судя по полученным результатам, за вегетационный период было способно минерализоваться только 17-50% подвижного ОВ, завися от доз минеральных и органических удобрений и кратности их внесения (табл. 13 и 18). Чем больше в почве содержится $C_{\text{подв}}$, тем выше обеспеченность активным ОВ (рис. 20).

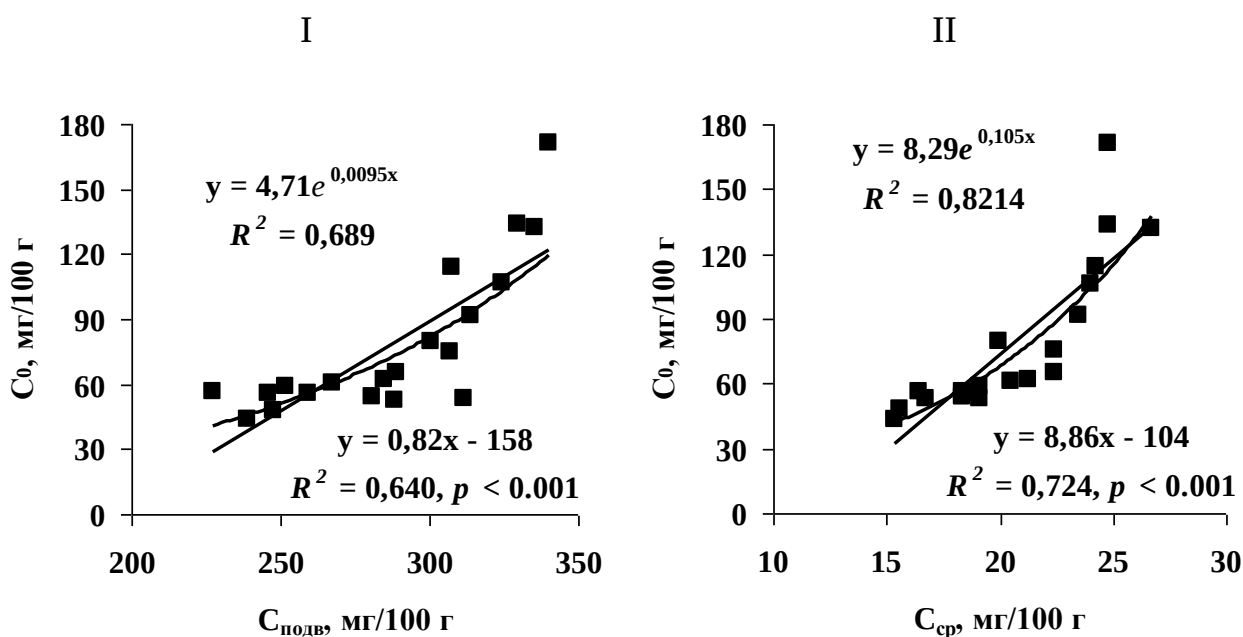


Рис. 20. Зависимость содержаний активного (C_0 , y) органического вещества с подвижной ($C_{\text{подв}}$, x) и растворенной ($C_{\text{ср}}$, x) фракциями в почве с применением возрастающих доз минеральных и органических удобрений.

На фракцию растворенного ОВ приходилось от 14 до 36% активного ОВ, при этом при минеральной системе доля $C_{\text{раст}}$ в C_0 была выше, чем при органическом удобрении (табл. 19). Содержание $C_{\text{раст}}$ в почве также дает представление о степени ее обеспеченности активным ОВ, как это следует из достоверной зависимости между этими показателями (рис. 20). По уравнениям, приведенным на рис. 20, можно рассчитать, что увеличение в почве подвижного и растворенного ОВ соответственно на 100 и 10 мг/100 г

позволит повысить содержание активного ОВ на 50-80 и 44-74 мг/100 г соответственно.

Таким образом, содержания углерода в растворенной и подвижной фракциях, коррелируя с активным пулом, отображают разные характеристики качества почвенного органического вещества

3.5.3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Не все подвижное органическое вещество почвы является активным, а в растворенном состоянии находится лишь часть активного органического вещества, содержащегося в почве. Содержание в серой лесной почве под залежью и посевами культур с разными системами удобрения подвижного (экстракция раствором 0.1 н. NaOH) органического вещества было в 1.9-5.2 раза больше, а растворенного (вытяжка 0.5 н. K₂SO₄) в 1.3-5.9 раз меньше, чем активного органического вещества. Содержание растворенного ОВ в почвах коррелировало с легко минерализуемой фракцией активного пула, а подвижного – с трудно минерализуемой. При внесении возрастающих доз минеральных и органических удобрений на долю растворенного, подвижного и активного органического вещества в серой лесной почве приходилось соответственно 1.6-2.3, 22-31 и 4.6-11.1% от валового C_{орг}. Содержание углерода в почве с возрастающими дозами органических удобрений в этих фракциях и активном пуле было в среднем за два года опыта соответственно в 1.3, 1.2 и 2.0 раза выше, чем при внесении минеральных удобрений. На фоне минеральных удобрений содержание активного органического вещества составляло 17-25% от подвижного, а при внесении органических удобрений – 25-50%. От 14 до 35% активного органического вещества было представлено растворенными компонентами. Прирост содержания подвижной и растворенной фракций органического вещества в серой лесной почве на 100 и 10 мг С/100 г будет сопровождаться увеличением размеров активного пула соответственно на 30-80 и 23-74 мг С/100 г.

3.6. ОПРЕДЕЛЕНИЕ АКТИВНОГО ОРГАНИЧЕСКОГО ВЕЩЕСТВА В СИСТЕМЕ АГРОХИМИЧЕСКОЙ ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА ПОЧВЫ

Поддержание качества почвы – ключевое условие устойчивого функционирования агроэкосистем и земледелия в целом. Оценка качества почвы дает представление, как свойства почвы и почвенные процессы взаимодействуют в границах экосистем [Karlen et al, 2003]. В самом простом понимании «качество почвы – это потенциал ее функционирования» [Karlen et al, 1997]. В расширенном определении под качеством почвы понимается «способность определенного вида почвы функционировать, в пределах естественных или искусственных границ экосистемы, обеспечивать продуктивность растений и животных, поддерживать или улучшать качество воды и воздуха, и поддерживать здоровье человека и его среду обитания» [Doran et al, 1996; Karlen et al, 1997]. Категория качества почвы неразрывно связана с понятием «здоровья почвы». Если первое определяет физико-химические функции почвы, то здоровье почвы, как более широкое понятие, охватывает весь спектр биологических и экологических функций почвы [Семенов и др., 2011]. Как интегральный показатель, качество почвы оценивается комплексом разночувствительных параметров. Состояние качества почвы регистрируется как морфологическими (структура, цвет, комковатость, уплотненность, глубина распространения корневых систем, наличие эрозии), так и физико-химическими параметрами ($C_{\text{орг}}$, pH, подвижные фосфаты и калий, общий азот и нитраты, емкость катионного обмена, объемная плотность, влагоемкость и др.) [Carter, 2002; Karlen et al, 2003]. При оценке качества почвы следует оценивать биологические характеристики почвы, отражающие кинетику почвенных процессов, а также учитывать динамичные, изменчивые параметры, отражающие биомассу и видовой состав почвенного макро-, мезо- и микросообщества [Karlen et al, 2003]. К настоящему времени предложено уже до 60-100 индикаторов качества и здоровья почвы [Семенов и др., 2011].

Валовое содержание органического вещества (C_{org}), является консервативным показателем качества почвы, тесно связано с большинством свойств и режимов почвы, способствуя их оптимизации. Почвенное органическое вещество осуществляет биологические, физические, химические и экологические функции транспортных, регуляторных, аккумулятивных, защитных и физиологических процессов [Орлов и др., 2004, Фокин, 1994; Krull et al, 2004]. Увеличение содержания органического вещества способствует улучшению пищевого, воздушного, гидротермического режимов почвы, что благоприятно сказывается на легкости ее обработки в оптимальные для посева культур сроки [Karlen et al, 2003].

Более динамичным показателем является углерод микробной биомассы (C_{mb}), который характеризует биотическую часть трансформации ПОВ, но он чувствителен к температуре, осадкам, влиянию фито- и зооценозов. Роль ПОВ и его разных пулов, как индикатора качества почвы, проявляется посредством влияния на урожайность, доступность элементов питания, водный режим и буферность [Loveland, Webb, 2003]. Активный пул ПОВ выполняет функцию обеспечения сельскохозяйственных культур азотом и фосфором, контролирует доступность многих микроэлементов. Медленный пул и пассивный пул ПОВ не оказывают прямого действия на питательный режим, но исключительно важны для поддержания органо-минеральной матрицы почвы, контролирующей большинство физических и химических свойств почвы.

Чем точнее оценка и выше точность определения агрохимических параметров почвы, тем объективнее выводы о состоянии плодородия и эффективнее рекомендуемые агротехнические приемы. Репрезентативность и воспроизводимость агрохимических показателей почвы во многом зависят от многолетней и сезонной изменчивости свойств почвы, пространственной вариабельности и аналитической ошибки измерений [Когут и др., 2011]. Чем динамичнее измеряемый параметр, тем значимее срок отбора почвенных

проб. Это хорошо подтверждается оценкой существенности различий агрохимических показателей по t_{05} тесту между весенним и осенним сроками отбора почвенных проб для 9 вариантов, включающих залежи и посевы культур с разными системами удобрения (табл. 20, Приложения 11-22).

Таблица 20. Существенность различий агрохимических и биологических показателей серой лесной почвы между весенним и осенним отборами проб по t_{05} -тесту

Показатель	Вариант								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$C_{орг}, \%$	—	—	—	—	—	—	—	—	—
pH_{KCl}	—	—	—	+	+	—	—	—	+
$N_{г}, \text{мг-экв}/100 \text{ г}$	+	—	—	—	+	+	+	+	—
$N_{общ}, \text{мг}/100 \text{ г}$	—	—	—	—	—	+	—	+	—
$N_{мин}, \text{мг}/100 \text{ г}$	—	+	+	+	+	+	+	+	+
$K_2O, \text{мг}/100 \text{ г}$	—	—	—	+	+	—	—	+	
$P_2O_5, \text{мг}/100 \text{ г}$	—	—	+	+	—	—	+	+	—
$C_0, \text{мг}/100 \text{ г}$	—	—	—	—	+	—	—	—	—
$C_1, \text{мг}/100 \text{ г}$	—	—	—	+	+	+	+	+	+
$C_2, \text{мг}/100 \text{ г}$	—	+	+	0	+	0	0	+	0
$C_3, \text{мг}/100 \text{ г}$	+	—	+	+	—	—	+	+	—
$C_{подв}, \text{мг}/100 \text{ г}$	—	—	—	—	—	—	—	+	—
$C_{ср}, \text{мг}/100 \text{ г}$	+	+	+	+	+	+	+	+	+

Примечание: Разница средних существенна (+), не существенна (—), нет данных (0) из-за отсутствия умеренно минерализуемой фракции в активном пуле.

По количеству существенных различий между весенним и осенним отборами все агрохимические параметры и показатели состояния ПОВ были условно отнесены к сильно изменчивым (7-9 случаев), средне изменчивым (4-6 случаев из 9), слабо изменчивым (2-3 случая) и относительно стабильным (до 1 случая) (Приложения 12-23). Сильной изменчивостью характеризовались $N_{мин}$ и $C_{раств}$ (табл. 8, 17 и 20). Группу умеренно изменчивых параметров составляли гидролитическая кислотность, подвижные формы фосфора и калия, а также углерод легко, умеренно и

трудно минерализуемых фракций активного пула ПОВ (табл. 8, 15 и 20). Слабую изменчивость демонстрировали pH_{KCl} и $N_{общ}$, тогда как подвижный ($C_{подв}$), активный (C_0) и общий органический углерод ($C_{орг}$) можно считать относительно стабильными на протяжении вегетационного сезона (табл. 8, 12, 17 и 20). Очевидно, что для изменчивых параметров количественные их значения должны строго соотноситься со сроком отбора проб, а относительно стабильными можно оперировать без особой привязки к моменту отбора в течение сезона. Поэтому при оценке изменений структуры активного пула ПОВ важно знать, в какое время года были отобраны образцы, а при характеристике обеспеченности почвы валовым и активным ОВ сезонный фактор не играет принципиальной роли.

Главное неудобство при определении активного ОВ – это длительность инкубации почвенных образцов, продолжительность которой должна быть не меньше вегетационного периода. На примере анализа большого числа экспериментальных данных было показано [Franzluebbers et al, 2000; Franzluebbers et al, 2001], что количество $C-CO_2$, выделившегося за 3 дня инкубации предварительно высушенных образцов почвы, хорошо диагностирует потенциальную минерализуемость ПОВ. Однако, как отмечалось выше, в течение первых нескольких суток с начала инкубации преимущественно минерализуются наиболее доступные микроорганизмам соединения, составляющие только 8-25% от потенциально-минерализуемого пула. Более адекватный прогноз обеспеченности почвы потенциально-минерализуемым ОВ без многомесячной инкубации образцов дает его вычисление по данным кумулятивного продуцирования $C-CO_2$ за 20-и суточный период инкубации, как это отчетливо продемонстрировано для дерново-подзолистой почвы, типичного и выщелоченного чернозема [Семенов и др., 2013]. Предложенная 20-и суточная длительность инкубации отвечает двум главным требованиям: во-первых, не обременительно длительна, а во-вторых, она достаточна, чтобы нивелировались различия по скорости выделения $C-CO_2$, которые свойственны динамике его

продуцирования в течение многомесячной инкубации почвенных образцов. Связь между содержанием в серой лесной почве C_0 (мг/100 г) и кумулятивным количеством $C\text{-CO}_2$ (мг/100 г), выделившимся за 20-дневный период, описывалась следующим уравнением (уравнение 6):

$$C_0 = 1.86 \cdot C\text{-CO}_2 + 3.27, \quad r = 0.931, \quad p < 10^{-4} \quad (6).$$

Вычисленные по этому уравнению величины C_0 , тесно коррелировали с фактическими его значениями, полученными при 23-недельной инкубации, а разность средних была не существенна по $t_{0.5}$ -критерию (рис. 21, приложение 24).

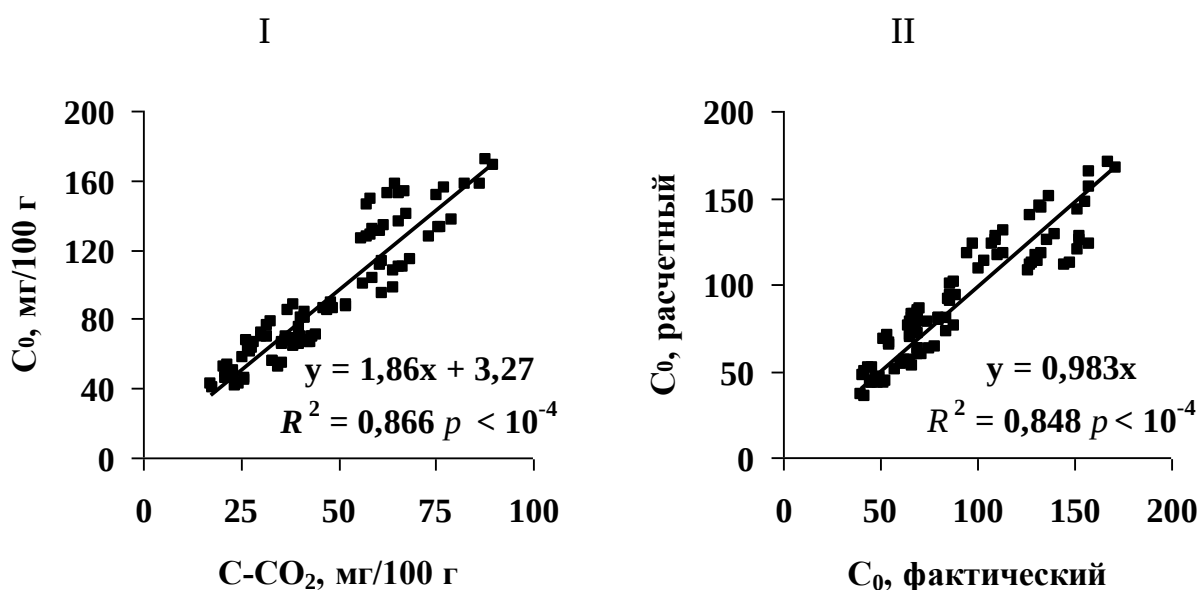


Рис. 21. Оперативное определение обеспеченности серой лесной почвы активным органическим веществом. I – Взаимосвязь между кумулятивным количеством выделившегося $C\text{-CO}_2$ за 20-суточную инкубацию и исходным содержанием потенциально-минерализуемого (C_0) органического вещества. II – Зависимость между фактическим и расчетным содержанием C_0 в почве.

3.6.1. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Определение в почве содержания активного органического вещества является надежным, воспроизводимым и чувствительным способом оценки состояния почвенного органического вещества, позволяющим уловить, объяснить и предсказать тенденцию изменения его качества в зависимости

от характера землепользования или системы удобрения культур. При характеристике обеспеченности почвы валовым и активным ОВ сезонный фактор отбора почвенных образцов не играет принципиальной роли, а при потребности в подробной оценке изменений структуры активного пула ПОВ важно знать, в какое время года были отобраны образцы почвы. В целях оперативной диагностики обеспеченности серой лесной почвы активным (потенциально-минерализуемым) ОВ можно ограничиться 20-суточной инкубацией, пересчитав кумулятивное количество $C-CO_2$ в C_0 с помощью уравнения, полученного опытным путем. Чтобы уловить качественные изменения в ПОВ, необходимо его биокинетическое фракционирование по результатам длительной инкубации почвенных образцов.

ВЫВОДЫ

1. Определение содержания в почве активного (потенциально-минерализуемого) органического вещества является объективным, воспроизводимым и чувствительным способом оценки изменений качества почвенного органического вещества, вызываемых применением органической, минеральной и органо-минеральной систем удобрения.
2. Самый высокий уровень обеспеченности пахотной серой лесной почвы активным органическим веществом, соизмеримый с почвой под залежью (121-125 мг/100 г), был при органической системе удобрения (88-96 мг/100 г), а наименьший – с интенсивным применением минеральных удобрений под культуры, возделываемые по методу Миттлайдера (47-48 мг/100 г). Почва с органо-минеральной системой удобрения занимала промежуточное положение по обеспеченности активным органическим веществом (67-76 мг/100 г).
3. Увеличение содержания $C_{орг}$ в серой лесной почве на 0.5% от массы почвы сопровождается ростом активного органического вещества на 31-95 мг/100 г почвы. Применение минеральных удобрений в возрастающих дозах в течение двух лет не оказывало существенного влияния на обеспеченность почвы активным органическим веществом, тогда как повышение дозы органических удобрений давало линейный прирост его содержания в пределах 216-350 мг на 1 т азота, внесенного с навозом.
4. Активный пул органического вещества серой лесной почвы под залежью и посевами с органической системой удобрения представлен легко, умеренно и трудно минерализуемыми фракциями со временем полного обновления в течение 2-4, 13-29 и 166-500 суток соответственно. Применение минеральных удобрений приводит к упрощению структуры активного пула, вследствие утраты умеренно минерализуемой фракции и мобилизации трудно минерализуемых компонентов. Ежегодное внесение органических удобрений устраняет свойственные пахотным почвам нарушения

качественного состава почвенного органического вещества, делая его более разнообразным и полноценным.

5. Минеральные и органические удобрения оказывают принципиально разное влияние на углеродминерализующую активность почвы, величина которой дает интегральное представление о размерах доступного для микроорганизмов субстрата и активности использования этого субстрата микроорганизмами. Минеральные удобрения, оказывая мобилизирующее действие на трудно минерализуемые компоненты почвенного органического вещества, не стимулировали процессы минерализации в почве. Реальное увеличение углеродминерализующей активности серой лесной почвы обеспечивало применение органических удобрений.

6. Содержание подвижного (0.1 н. NaOH) органического вещества в серой лесной почве под залежью и посевами культур с разными системами удобрения было в 1.9-5.2 раза больше, а растворенного (0.5 н. K_2SO_4) в 1.3-5.9 раз меньше, чем активного органического вещества. Содержание растворенного органического вещества в почвах коррелировало с легко минерализуемой фракцией активного пула, а подвижного – с трудно минерализуемой.

7. Увеличение содержания в серой лесной почве подвижной и растворенной фракций органического вещества на 100 и 10 мг С/100 г эквивалентно увеличению размеров активного пула на 30-80 и 23-74 мг С/100 г соответственно.

8. Содержание активного органического вещества является относительно стабильным диагностическим показателем в системе агрохимической оценки качества почвы без существенных различий при определении в образцах весеннего или осеннего отборов, тогда как структура активного пула зависит от срока отбора проб в течение вегетационного сезона.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Агроэкологическая оценка земель, проектирование адаптивно-ландшафтных систем земледелия и агротехнологий. / Под редакцией В.И.Кирюшина и А.Л.Иванова. М.: ФГНУ «Росинформагротех», 2005. 784 с.
2. Александрова Л.Н. Органическое вещество почвы и процессы его трансформации. Л.: Наука, 1980. 280 с.
3. Алифанов В.М. Палеокриогенез и современное почвообразование. Пушкино: ОНТИ, 1995. 320 с.
4. Аринушкина Е.В. Руководство по химическому анализу почв. Изд-во МГУ 1970. 447 с.
5. Ахтырцев Б.П. К истории формирования серых лесных почв Среднерусской лесостепи // Почвоведение. 1992. № 3. С. 5-18.
6. Ахтырцев Б.П. Серые лесные почвы Центральной России. Воронеж: Изд-во ВГУ, 1979. 232 с.
7. Ахтырцев Б.П., Шевченко Г.А. Изменение агрохимических свойств серых лесных почв центральной черноземной полосы при их окультуривании // Агрохимия. 1965. № 4 . С. 38-50.
8. Баздырев Г.И., Захаренко А.В., Лошаков В.Г., Рассадин А.Я., Сафонов А.Ф., Туликов А.М. Земледелие.-М.: КолосС, 2008. 607 с.
9. Беляев А.Б. Становление и развитие земледелия (периоды в земледелии). Учебно-методическое пособие. Воронеж. ВГУ, 2004. 31 с.
10. Береснев Б.Г., Нестерович И.А., Матюшина Т.И. Влияние систематического внесения возрастающих доз бесподстилочного навоза в севообороте на плодородие дерново-подзолистой почвы //Агрохимия. 1989. № 9. С. 50-60.

11. Богатырева Е.Е., Серая Т.М., Черныш А.Ф., Бирюкова О.М., Устинова А.М. Влияние севооборотов и систем удобрений на содержание и качественный состав подвижных гумусовых веществ в дерново-подзолистых эродированных почвах // Агрохимия. 2013. № 7. С. 16-24.
12. Борисов Б.А., Ганжара Н.Ф. Географические закономерности распределения и обновления легкоразлагаемого органического вещества целинных и пахотных почв зонального ряда Европейской части России // Почвоведение. 2008. № 9. С. 1071-1078.
13. Бочкарев А.Н., Кудеяров В.Н. Определение нитратов в почве, воде и растениях // Химия в сельском хозяйстве. 1982. №4. С.49-52.
14. Бугаев В.П., Осипова З.М. Длительное применение возрастающих доз минеральных удобрений на дерново-подзолистой тяжелосуглинистой почве // Агрохимия. 1968. № 11. С. 17-25.
15. Вадюнина А. Ф., Корчагина А. Методы исследования физических свойств почв. 3-е изд., перераб. и доп. М.: Агропромиздат, 1986. 416 с.
16. Важенина Е.А. Оптимизация пищевого режима серых лесных почв // Оптимизация свойств почв Нечерноземья и повышение их плодородия. М.: Почвенный институт, 1984. с. 35-42.
17. Васильев В.А., Просенков В.И., Писарева М.Г., Мирошникова Л.С., Захаров В.Н., Слизовская Н.А. Влияние удобрений на миграцию элементов по профилю почвы. Сообщение 1. Влияние длительного применения возрастающих доз минеральных туков на навозном и безнавозном фонах на миграцию нитратов // Агрохимия. 1980. № 12. С. 56-62.
18. Вендило Г.Г., Петриченко В.Н., Скаржинский А.А. Влияние возрастающих доз удобрений на урожай овощных культур, качество

продукции и плодородие пойменной почвы// Агрохимия. 1986. № 4. С. 48-54.

19. Ганжара Н.Ф. Гумус, свойства почв и урожай // Почвоведение. 1998. № 7. С. 812-819.
20. Ганжара Н.Ф., Байбеков Р.Ф., Борисов Б.А., Надежкин С.М. Оптимизация содержания лабильного органического вещества в почвах лесостепи Поволжья // Плодородие. 2010. № 5. С. 15-17.
21. Ганжара Н.Ф., Борисов В.А., Флоринский М.А. Легкоразлагаемые органические вещества почв // Химизация сельского хозяйства. 1990. № 1. С. 53-55.
22. Ганжара Н.Ф., Верзилин В.В., Байбеков Р.Ф., Борисов Б.А. Состояние органического вещества и соединений азота черноземов выщелоченных в зависимости от способов возделывания культур // Известия ТСХА. 2005. № 3. С. 3-12.
23. Гомонова Н.Ф., Минеев В.Г. Динамика гумусного состояния и азотного режима дерново-подзолистой среднесуглинистой почвы при длительном применении удобрений // Агрохимия. 2012. № 6. С. 23-31.
24. Горчаков Я.В., Дурманов Д.Н. Мировое органическое земледелие XXI века. М.: ПАИМС, 2002. 402 с.
25. Григорьян Б.Р., Кольцова Т.Г., Сунгатуллина Л.М. Органическое земледелие – залог сохранения почвенных ресурсов и улучшения их плодородия // Материалы Международной научной конференции «Наследие И.В. Тюриня в современных исследованиях в почвоведении». Казань: Изд-во «Отечество». 2013. С. 59-62.
26. Григорьян Б.Р., Николаева Т.Г., Сунгатуллина Л.М. Изменение биологических параметров почвенной экосистемы в агробиоценозах в условиях различных систем земледелия // Георесурсы. 2011. № 2(38). С. 9-13.

27. Дедов А.В. Философские проблемы земледелия. Учебное пособие. Воронеж. ВГАУ, 2001. 178 с.
28. Державин Л.М. Роль химизации и биологизации земледелия в отечественном производстве сельскохозяйственной продукции и обеспечение продовольственной безопасности РФ //Агрохимия. 2010. № 9. С. 3-18.
29. Добровольский Г.В., Никитин Е.Д. Экология почв. Учение об экологических функциях почв: учебник. 2006. М.: МГУ, 364 с.
30. Завьялова Н.Е., Кончиц В.А. Влияние приемов землепользования на трансформацию гуминовых кислот дерново-подзолистой почвы Предуралья // Почвоведение. 2011. № 1. С. 103-110.
31. Земледелие. Термины и определения. ГОСТ 16265-89.
32. Иванова Т.И., Кожемякова Р.Н., Пушенков В.С. Отзывчивость ячменя на возрастающие дозы азотных, фосфорных, калийных удобрений в полевом многофакторном опыте на дерново-подзолистой почве //Агрохимия. 1971. № 7. С. 77-84.
33. Карпова Д.В., Чижикова Н.П., Чернов О.С., Батяхина Н.А. Изменение качества гумуса серых лесных почв при внесении удобрений // Плодородие. 2008. № 2. С. 9-11.
34. Кирюшин В.И., Ганжара Н.Ф., Кауричев И.С., Орлов Д.С., Титлянова А.А., Фокин А.Д. Концепция оптимизации режима органического вещества почв в агроландшафтах. М.: Изд-во МСХА, 1993. 99 с.
35. Ковалев Е. Органическое и биодинамическое земледелие // Мировая экономика и международные отношения. 2006. № 5. С. 10-16.
36. Ковда В.А., Розанов Б.Г. Почвоведение. Ч.1. Почва и почвообразование. М.: Высшая школа, 1988. 400 с.
37. Когут Б.М. Принципы и методы оценки содержания трансформируемого органического вещества в пахотных почвах // Почвоведение. 2003. № 3.

С. 308-316.

38. Когут Б.М., Фрид А.С., Масютенко Н. П., Куваева Ю.В., Романенков В.А., Лазарев В.И., Холодов В.А. Динамика содержания органического углерода в типичном черноземе в условиях длительного полевого опыта // Агрохимия. 2011. № 12. С. 37-44.
39. Когут Б.М. Оценка содержания гумуса в пахотных почвах России // Почвоведение. 2012. № 9. С. 944-952.
40. Кононова М. М. Органическое вещество почвы. М.: Изд-во АН СССР, 1963. 314 с.
41. Кончиц В.А., Литвинский В.А., Черников В.А. Содержание и состав органического вещества дерново-подзолистой почвы после длительного применения удобрений // Плодородие. 2010. № 5. С. 17-19.
42. Криштапоните И., Майкштенене С. Влияние длительного применения разных систем удобрения на плодородие тяжелосуглинистой почвы и продуктивность севооборота // Агрохимия. 2005. № 11. С. 34-42.
43. Кудяров В.Н. Азотно-углеродный баланс в почве // Почвоведение. 1999. № 1. С. 73-82.
44. Кудяров В.Н. К методике определения общего азота в почвах и растениях // Агрохимия. 1972. № 11. С.125-128.
45. Кудяров В.Н., Башкин В.Н., Кудярова А.Ю., Бочкарев А.Н. Экологические проблемы применения удобрений. М.: Наука, 1984. 213 с.
46. Кузнецов А.М., Иванникова Л.А., Семин В.Ю., Надежкин С.М., Семенов В.М. Влияние длительного применения удобрений на биологическое качество органического вещества выщелоченного чернозема // Агрохимия. 2007. № 11. С. 21-31.

47. Кузьменко Н.Н. Плодородие дерново-подзолистой почвы при длительном применении различных систем удобрения // *Агрохимия*. 2010. № 4. С. 11-17.
48. Кулаков В.А., Леонидова Т.В., Седова Е.Г. Влияние удобрений на продуктивность пастбищных агрофитоценозов длительного пользования и плодородие дерново-подзолистой суглинистой почвы // *Агрохимия*. 2012. № 1. С. 42-49.
49. Кульбида В.В., Бородань В.А. Альтернативное земледелие: его возможности и перспективы // *Земледелие*. 1994. № 5. С. 16-18.
50. Лазурский А.В., Кардиналовская Р.И. Влияние навоза на плодородие почвы, урожай культур, его качество в связи с уровнем применения минеральных удобрений // *Агрохимия*. 1966. № 1. С. 45-55.
51. Лапа В.В., Босак В.Н., Пироговская Г.В. Влияние органо-минеральной системы удобрения на продуктивность севооборотов и баланс гумуса в дерново-подзолистых почвах // *Агрохимия*. 2009. № 2. С. 40-44.
52. Лапа В.В., Серая Т.М., Богатырева Е.Н., Бирюкова О.М. Влияние длительного применения удобрений на групповой и фракционный состав гумуса дерново-подзолистой легкосуглинистой почвы // *Почвоведение*. 2011. № 1. С. 111-116.
53. Лепнев Д.А., Корабельников Н.П. Изменение агрохимических свойств серых лесных почв под влиянием культуры земледелия и внесенных органических и минеральных удобрений // *Агрохимия* 1964. № 10. С.108-117.
54. 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 опыте Д.Н.Прянишникова № 2 на Долгопрудной агрохимической опытной станции // *Агрохимия*. 2010. № 9. С. 19-30.

55. Лыков А.М. Введение в биогеоценотическое (адаптивно-биосферное) земледелие // Плодородие. 2006. № 1. С. 27-32.
56. Лыков А.М. Воспроизводство плодородия почв в Нечерноземной зоне. М.: Россельхозиздат, 1982. 143 с.
57. Люри Д.И., Горячкин С.В., Караваева Н.А., Денисенко Е.А., Нефедова Т.Г. Динамика сельскохозяйственных земель в России в XX веке и постагрогенное восстановление растительности и почв. М.: ГЕОС, 2010. 416 с.
58. Мамонтов В.Г., Афанасьев Р.А., Родионова Л.П., Быканова О.М. К вопросу о лабильном органическом веществе почв // Плодородие. 2008. № 2. С. 20-22
59. Медведева О. Е. Проблемы устойчивого землепользования в России. - М.: М 42 ООО «Типография Левко», Институт устойчивого развития /Центр экологической политики России. 2009. 104 с.
60. Мерзлая Г.Е., Еськов А.И., Тарасов С.И. Действие и последствие систем удобрения с использованием навоза // Плодородие. № 3. 2011. С. 16-19.
61. Мерзлая Г.Е., Ефремов В.Ф., Лукин С.М., Русакова И.В., Тарасов С.И., Шелганов И.И., Коновалов Н.Д. Результаты исследования состояния органического вещества почв при длительном применении различных видов органических удобрений // Влияние длительного применения удобрений на органическое вещество почв. М.: ВНИИА, 2010. С. 231-308.
62. Мерзлая Г.Е., Зябкина Г.А., Фомкина Т.П. Длительное применение органических и минеральных удобрений при оптимизации их доз и сочетаний на легкосуглинистой почве // Агрохимия. 2006. № 10. С. 33-40

63. 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.
64. 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.
65. Минеев В.Г., Дебрецени Б., Мазур Т. Биологическое земледелие и минеральные удобрения. М.: Колос, 1993. 415 с.
66. Минеев В.Г., Ремпе Е.Х. Экологические последствия длительного применения повышенных и высоких доз минеральных удобрений // *Агрохимия*. 1991. № 3. С. 35-49.
67. Наумова Н.Б., Макарикова Р.П., Савенков О.А., Анкудович Ю.Н., Вервайн О.Д. Влияние удобрений на химические свойства дерново-подзолистой почвы в зернотравяном севообороте в длительном полевом опыте // *Агрохимия*. 2012. № 3. С. 3-11.
68. Нечаев Л.А., Черкасов Г.Н., Коротаев В.И. Продуктивность зернопропашного севооборота и агрохимические свойства темно-серой лесной почвы в зависимости от зернобобовых культур, удобрений и способов основной обработки почвы // *Агрохимия*. 2013. № 1. С. 3-17.
69. Никитишен В.И. Питание растений и удобрение агроэкосистем в условиях ополей Центральной России. М.: Наука, 2012. 485 с.
70. Овчинникова М.Ф. Признаки и механизм агрогенной трансформации гумусовых веществ дерново-подзолистой почвы // *Агрохимия*. 2012. № 1. С. 3-13.

71. Овчинникова М.Ф., Гомонова Н.Ф., Минеев В.Г. Содержание, состав, подвижность гумусовых веществ дерново-подзолистой почвы и уровень ее биопродуктивности при длительном применении агрохимических средств // Докл. РАСХН. 2003. № 5. С. 22-25.
72. Орлов Д.С., Бирюкова О.Н. Запасы углерода органических соединений в почвах Российской Федерации // Почвоведение. 1995. №1. С. 21-32.
73. Орлов Д.С., Бирюкова О.Н. Устойчивость органических соединений почвы и эмиссия парниковых газов в атмосферу // Почвоведение. 1998. № 7. С. 783-793.
74. Орлов Д.С., Бирюкова О.Н., Розанова М.С. Дополнительные показатели гумусного состояния почв и их генетических горизонтов // Почвоведение. 2004. № 8. С. 918-926.
75. Орлов Д.С., Бирюкова О.Н., Розанова М.С. Реальные и кажущиеся потери органического вещества почвами Российской Федерации // Почвоведение. 1996. № 2. С. 197-207.
76. Орлова О.В., Тарасов С.И., Архипченко И.А. Величина активного пула углерода в почве при длительном внесении бесподстилочного навоза // Доклады РАСХН. 2006. № 1. С. 26-28.
77. Осипова З.М., Хлыстовский А.Д. Длительное применение разных доз минеральных удобрений на дерново-подзолистой суглинистой почве и влияние удобрений на почву и химический состав растений // Агрохимия. 1969. № 2. С. 54-63.
78. Переверзев В.Н., Коробейникова Н.М., Баскова Л.А. Эффективность применения органических и минеральных удобрений при выращивании овса на новоосвоенной и слабоокультуренной подзолистых почвах // Агрохимия №2. 2009. С.35-39.

79. Петрова Л.И. Эффективность навоза и минеральных удобрений на дерново-подзолистой почве в льняном севообороте // Агрохимия. 1965. № 11. С.117-123.
80. Полякова Н.В. Гумусное состояние пахотных серых лесных почв // Плодородие. 2008. № 2. С. 19-20.
81. Почвы, биогеохимические циклы и биосфера. Развитие идей Виктора Абрамовича Ковды. Под редакцией Н.Ф.Глазовского. М.: КМК, 2004. С. 201-202.
82. Придворев Н.И., Верзилин В.В., Маслов В.А., Пичугин А.П., Сидяков Е.А. зависимость плодородия чернозема выщелоченного от приемов его воспроизводства в севообороте // Агрохимия. 2009. № 3. С. 18-27.
83. Прижуков Ф.Б., Ямчук К.Т. О методах альтернативного земледелия за рубежом // Земледелие. 1984. № 12. С
84. Природа Тульского края. URL: <http://tsput.ru/res/natura/tulanature/g0.htm> (19.02.2014).
85. Романенков В.А, Сиротенко О.Д., Рухович Д.И., Романенко И.А, Шевцова Л.К., Королева П.В. Прогноз динамики запасов органического углерода пахотных земель Европейской территории России. М.: ВНИИА, 2009. 96 с.
86. Романенков В.А. Динамика запасов почвенного углерода в агроценозах европейской территории России (по данным длительных агрохимических опытов): Автореф. дис...докт. биол. наук. М., 2011. 47 с.
87. Сафонов А.Ф., Гатаулин А.М., Платонов И.Г., Лошаков В.Г., Жуков Ю.П., Баздырев Г.И., Пыльнев В.В., Федотов В.А., Кадыров С.В., Михалев С.С., Рассадин А.Я. Системы земледелия. М.: КолосС, 2006. 447 с.

88. Семенов А.М., Семенов В.М., Ван Бругген А.Х.К. Диагностика здоровья и качества почвы //Агрохимия. 2011. № 12. С.4-20.
89. Семенов В.М., Иванникова Л.А., Кузнецова Т.В., Семенова Н.А. Роль растительной биомассы в формировании активного пула органического вещества почвы // Почвоведение. 2004. № 11. С. 1350-1359.
90. Семенов В.М., Иванникова Л.А., Кузнецова Т.В., Семенова Н.А., Тулина А.С. Минерализуемость органического вещества и углеродсеквестрирующая емкость почв зонального ряда // Почвоведение. 2008. № 7. С. 819-832.
91. Семенов В.М., Иванникова Л.А., Семенова Н.А., Ходжаева А.К., Удальцов С.Н. Минерализация органического вещества в разных по размеру агрегатных фракциях почвы // Почвоведение. 2010. № 2. С. 157-165
92. Семенов В.М., Иванникова Л.А., Тулина А.С. Стабилизация органического вещества в почве // Агрохимия. 2009. № 10. С. 77-96.
93. Семенов В.М., Когут Б.М., Лукин С.М., Шарков И.Н., Русакова И.В., Тулина А.С., Лазарев В.И. Оценка обеспеченности почв активным органическим веществом по результатам длительных полевых опытов // Агрохимия. 2013. № 3. С. 19-31.
94. Семенов В.М., Кравченко И.К., Иванникова Л.А., Кузнецова Т.В., Семенова Н.А., Гисперт М., Пардини Дж. Экспериментальное определение активного органического вещества в некоторых почвах природных и сельскохозяйственных экосистем // Почвоведение. 2006. № 3. С. 282-292.
95. Семенов В.М., Кузнецова Т.В., Кудеяров В.Н. Иммобилизационно - мобилизационные превращения азота в серой лесной почве // Почвоведение. 1995. № 4. С. 472-479.

96. Семенов В.М., Тулина А.С. Сравнительная характеристика минерализуемого пула органического вещества в почвах природных и сельскохозяйственных экосистем // Агрохимия. 2011. № 12. С. 53-63.
97. Семенов В.М., Ходжаева А.К. Агроэкологические функции растительных остатков в почве // Агрохимия. 2006. № 7. С. 63-81.
98. Соколов О.А., Семенов В.М., Агаев В.А. Нитраты в окружающей среде. Пушкино: ОНТИ НЦБИ, 1990. 316 с.
99. Сорокина Н.П., Когут Б.М. Динамика содержания гумуса в пахотных черноземах и подходы к ее изучению // Почвоведение. 1997. №2. С. 178-184.
100. Теория и методы химического анализа почв (Под редакцией Л.А. Воробьевой) – М.: Изд-во Моск. ун-та, 2006. 400 с.
101. Тюлин В.А., Беус Т.Б., Богданова В.Б. Влияние возрастающих доз органических удобрений и их комбинаций с минеральными удобрениями и известью на урожай и свойства дерново-подзолистой почвы // Агрохимия. 1967. № 8. С. 86-93.
102. Тюрин И.В. Органическое вещество почв. М.–Л.: Сельхозгиз, ЛО, 1937. 288 с.
103. Уваров Г.И., Карабутов А.П. Изменение агрохимических свойств чернозема типичного при применении удобрений в длительном полевом опыте // Агрохимия. 2012. № 4. С. 14-20.
104. Ульянова О.А., Кураченко Н.Л., Чупрова В.В. Влияние системы удобрения на плодородие чернозема выщелоченного красноярской лесостепи // Агрохимия. 2010. № 1. С. 10-19.
105. Урусевская И.С., Мешалкина Ю.Л., Хохлова О.С. Географо-генетические особенности гумусового состояния серых лесных почв // Почвоведение. 2000. №11. С.1377-1390.

106. Ушаков Р.Н. Качественный состав гумуса серой лесной почвы при внесении удобрений // Плодородие. 2008. № 2. С. 17-19.
107. Фокин А.Д. О роли органического вещества почв в функционировании природных и сельскохозяйственных экосистем // Почвоведение. 1994. № 4. С. 40-45.
108. Хабиров И.К., Сергеев В.С. Содержание гумуса в черноземе в зависимости от системы земледелия // Плодородие. 2008. № 2. С. 16-17.
109. Ходжаева А.К., Семенов В.М., Дулов Л.Е., Семенова Н.А., Кузнецова Т.В., Семенов А.М., Ван Бругген А.Х.К. Диагностика биологических свойств почвы при органической и традиционной системе земледелия // Агрохимия. 2010. № 5. с. 3-12.
110. Чеботарев Н.Т., Шморгунов Г.Т., Лаптева Е.М., Ермолина В.И., Кормановская В.М. Влияние длительного применения удобрений на содержание, фракционный состав и баланс гумуса в дерново-подзолистых почвах европейского Северо-востока // Агрохимия. 2009. № 10. С. 11-16.
111. Черкасов Г.Н., Нечаев Л.А., Коротеев В.И. Система точного земледелия в современных терминах и определениях // Доклады Российской академии сельскохозяйственных наук. 2009. № 5. С. 37-41.
112. Чуб М.П., Потатурина Н.В., Пронько В.В. Баланс гумуса при длительном применении минеральных и органических удобрений на южном черноземе засушливого Поволжья // Агрохимия. 2007. № 9. С. 10-17.
113. Чуб М.П., Пронько В.В., Сайфулина Л.Б., Ярошенко Т.М., Климова Н.Ф. Плодородие чернозема южного и продуктивность зернопарового севооборота при длительном применении минеральных удобрений // Агрохимия. 2010. № 7. С. 3-13.

114. Шарков И.Н. Концепция воспроизводства гумуса в почвах // Агрохимия. 2011. № 12. С. 21-27.
115. Шарков И.Н., Данилова А.А. Влияние агротехнических приемов на изменение содержания гумуса в пахотных почвах // Агрохимия. 2010. № 12. С. 72-81.
116. Шевцова Л.К. Современные направления в исследовании органического вещества почв в длительных опытах // Проблемы агрохимии и экологии. 2009. № 3. С. 39-47.
117. Шевцова Л.К., Хайдуков К.П., Кузьменко Н.Н. Трансформация органического вещества легкосуглинистой дерново-подзолистой почвы при длительном применении в льняном севообороте // Агрохимия. 2012. № 10. С. 3-12.
118. Щербаков А.П., Надежкин С.М. Антропогенная эволюция гумусного состояния чернозёмов в лесостепи Поволжья // Антропогенная эволюция черноземов. Воронеж: Воронежский Государственный Университет. 2000. С. 145-170.
119. Acs, S., Berentsen P. B. M., Huirne, R. B. M. Modelling conventional and organic farming: a review// J. of Life Sciences. 2005. № 53. P.1-18.
120. Alvarez R. A review of nitrogen fertilizer and conservation tillage effects on soil organic carbon storage // Soil Use and Management. 2005. V. 21. № 1. P. 38-52.
121. Araujo A.S.F., Santos V.B., Monteirot R.T.R. Responses of soil microbial biomass and activity for practices of organic and conventional farming systems in Piaui state, Brazil // European journal of soil biology. 2008. V. 44. P. 225–230.
122. Aronsson H., Torstensson G., Bergstro L. Leaching and crop uptake of N, P and K from organic and conventional cropping systems on a clay soil // Soil use and management. 2007. V. 23. P. 71-81.

123. Badley C., Perfecto I., Cassman K., Hendrix J. Can organic agriculture feed the world? // *Agronomy and Horticulture – Faculty Publications*. 2007. V. 22 (2). P. 80-85.
124. Bending G. D., Turner M. K., Rayns F., Marx M.-C., Wood M. Microbial and biochemical soil quality indicators and their potential for differentiating areas under contrasting agricultural management regimes // *Soil Biology & Biochemistry*. 2004. V. 36. P. 1785-1792.
125. Cardelli R., Levi-Minzi R., Saviozzi A., Riffaldi R. Organically and Conventionally Managed Soils: Biochemical Characteristics // *J. of Sustainable Agriculture*. 2004. V. 25(2). P. 63-74.
126. Carter M.R. Soil Quality for Sustainable Land Management: Organic Matter and Aggregation Interactions that Maintain Soil Functions // *Agron. J.* 2002. V. 94. P. 38-47.
127. Cavigelli M. A., Teasdale J. R., Conklin A. E. Long-Term Agronomic Performance of Organic and Conventional Field Crops in the Mid-Atlantic Region // *Agronomy J.* 2008. V. 100. № 3. P. 785-794.
128. Christopher S.F., Lal R. Nitrogen Management Affects Carbon Sequestration in North American Cropland Soils // *Critical Reviews in Plant Sciences*. 2007. V. 26. № 1. P. 45-64.
129. Condon L. M., Cameron K.C., Di H.J., Clough T. J., Forbes E.A., McLaren R. G., Silva R. G. A comparison of soil and environmental quality under organic and conventional farming systems in New Zealand // *New Zealand Journal of Agricultural Research*. 2000. V. 43. P. 443-466.
130. Dawson J. C., Huggins D. R., Jones S. Characterizing nitrogen use efficiency in natural and agricultural ecosystems to improve the performance of cereal crops in low-input and organic agricultural systems: a review// *Field Crops Research*. 2008. V. 107. P. 89-101.

131. Diepeningen A. D., Vos O. J., Korthals G. W., van Bruggen A. H.C. Effects of organic versus conventional management on chemical and biological parameters in agricultural soils // *Applied Soil Ecology*. 2006. V. 31. P. 120-135.
132. Doran J.W., Sarrantonio M., Liebig M.A. Soil Health and Sustainability // *Adv. Agron.* 1996. V. 56. P. 1–54.
133. Drinkwater L.E., Letourneau D.K., Workmen E., van Bruggen A. H. C., Shennan C. Fundamental differences between conventional and organic tomato agroecosystems in California // *Ecological Applications*. 1995. V. 5(4). P. 1098-1112.
134. Dufault R. J., Hester A., Ward B. Influence of organic and synthetic fertility on nitrate runoff and leaching, soil fertility, and sweet corn yield and quality // *Communications in Soil Science and Plant Analysis*. 2008. V. 39. P. 1858-1874.
135. Edmeades D.C. The long-term effects of manures and fertilizers on soil productivity and quality: a review // *Nutrient Cycling in Agroecosystems*. 2003. V. 66. № 2. P. 165-180.
136. Elmholt S., Labouriau R. Fungi in Danish soils under organic and conventional farming // *Agriculture, Ecosystems and Environment*. 2005. V. 107. P. 65-73.
137. Flessa H., Ruser R., Dörsch P., Kamp T., Jimenez M.A., Munch J.C., Beese F. Integrated evaluation of greenhouse gas emissions (CO₂, CH₄, N₂O) from two farming systems in southern Germany // *Agriculture, Ecosystems and Environment* 2002. V. 91. № 1-3. P. 175-189.
138. Fließbach A., Mader P. Niggli U. Mineralization and microbial assimilation of ¹⁴C-labeled straw in soils of organic and conventional agricultural systems // *Soil Biology & Biochemistry*. 2000. V. 32. P. 1131-1139.

139. Fließbach A., Oberholzer H.-R., Gunst L., Mader P. Soil organic matter and biological soil quality indicators after 21 years of organic and conventional farming// *Agriculture, Ecosystems and Environment*. 2007. V. 118. P. 273-284.
140. Franzluebbers A.J., Haney R.L., Honeycutt C.W., Arshad M.A., Schomberg H.H., Hons F.M. Climatic influences on active fractions of soil organic matter // *Soil Biology and Biochem*. 2001. V. 33. № 7-8. P. 1103-1111.
141. Franzluebbers A.J., Haney R.L., Honeycutt C.W., Schomberg H.H., Hons F.M. Flush of carbon dioxide following rewetting of dried soils relates to active organic pools // *Soil Sci. Soc. Amer. J.* 2000. V. 64. № 2. P. 613-623.
142. Ghosh S., Wilson B.R., Mandal B., Ghoshal S.K., Grown I. Changes in soil organic carbon pool in three long-term fertility experiments with different cropping systems and inorganic and organic soil amendments in the eastern cereal belt of India // *Austr. J. Soil Research*. 2010. V. 48. № 5. P. 413-420.
143. Gomiero T., Paoletti M. G., Pimentel D. Energy and Environmental Issues in Organic and Conventional Agriculture // *Critical Reviews in Plant Sciences*. 2008. V. 27. P.239-254.
144. Gosling P., Shepherd M. Long-term changes in soil fertility in organic arable farming systems in England, with particular reference to phosphorus and potassium // *Agriculture, Ecosystems and Environment*. 2005. V. 105. P. 425-432.
145. Gregorich E.G., Beare M.H., McKim U.F., Skjemstad J.O. Chemical and biological characteristics of physically uncomplexed organic matter // *Soil Sci. Soc. Am. J.* 2006. V. 70. № 3. P. 975–985.
146. Hai L., Li X.G., Li F.M., Suo D.R., Guggenberger G. Long-term fertilization and manuring effects on physically-separated soil organic matter pools under

- a wheat-wheat-maize cropping system in an arid region of China // *Soil Biology and Biochemistry*. 2010. V. 42. № 2. P. 253-259.
147. Haynes R.J., Naidu R. Influence of lime, fertilizer and manure applications on soil organic matter content and soil physical conditions: a review // *Nutrient Cycling in Agroecosystems*. 1998. V. 51. P. 123-137.
148. IFOAM (International Federation of Organic Agriculture Movements). URL: <http://www.ifoam.org> (7.02.2014).
149. Janzen H.H. The soil carbon dilemma: Shall we hoard it or use it? // *Soil Biol. and Biochem.* 2006. V. 38. № 3. P. 419-424.
150. Karlen D. L., Ditzler C. A., Andrews S. S. Soil quality: why and how? // *Geoderma* 2003. V. 114. P.145-156.
151. Karlen D.L., Mausbach M.J., Doran J.W., Cline R.G., Harris R.F., Schuman G.E. Soil quality: A concept, definition, and framework for evaluation // *Soil Sci. Soc. Am. J.* 1997. V. 61. P. 4-10.
152. Kasperczyk N., Knickel K., Kristlansen P., Taji A. Beyond the farm gate: Environmental impacts// *Organic agriculture: A global perspective* CSIRO. Publishing Collingwood. 2006. P. 259–294.
153. Kirchmann H., Bergstro L., Katterer T., Mattsson L., Gesslein S. Comparison of Long-Term Organic and Conventional Crop–Livestock Systems on a Previously Nutrient-Depleted Soil in Sweden // *Agron. J.* 2007. V. 99. P.960-972.
154. Krull E.S., Skjemstad J.O., Baldock J.A. Functions of soil organic matter and the effect on soil properties. CSIRO. Glen Osmond. Australia. 2004. 129 p. (URL: <http://www.grdc.com.au/uploads/documents/cso000291.pdf>).
155. Lampkin N. H. Researching organic farming systems. // *In The Economics of Organic Farming: An International Perspective* (Eds N. H. Lampkin & S. Padel). 1994. P. 27-44.

156. Liang Q., Chen H., Gong Y., Fan M., Yang H., Lal R., Kuzyakov Y. Effects of 15 years of manure and inorganic fertilizers on soil organic carbon fractions in a wheat-maize system in the North China Plain // *Nutr. Cycl. Agroecosyst.* 2012. V. 92. № 1. P. 21-33.
157. Lotter D. W. Organic Agriculture // *J. of Sustainable Agriculture.* 2003. V. 21 № 4. P. 59-128.
158. Loveland P., Webb J. Is there a critical level of organic matter in the agricultural soils of temperate regions: a review // *Soil Tillage Res.* 2003. V. 70. № 1. P. 1-18.
159. Mäder P., Fließbach A., Dubois D., Gunst L., Fried P., Niggli U. Soil fertility and biodiversity in organic farming // *Science.* 2002. V. 296. № 5573. P. 1694-1697.
160. Mäder P., Hahn D., Dubois D., Gunst L., Alföldi T., Bergmann H., Oehme M., Amadò R., Schneider H., Graf U., Velimirov A., Fließbach A., Niggli U. Wheat quality in organic and conventional farming: results of a 21 year field experiment // *J. Sci. Food Agric.* 2007. V. 87. № 10. P. 1826-1835.
161. Marriott E.E., Wander M.M. Total and Labile Soil Organic Matter in Organic and Conventional Farming Systems // *Soil Sci. Soc. Am. J.* 2006. V. 70. № 3. P. 950-959.
162. Mason H. E., Spaner D. Competitive ability of wheat in conventional and organic management systems: a review // *Canadian J. Plant Sci.* 2005. V. 86. P. 333–343.
163. Mittleider J.R. Grow-bed gardening. Santa Barbara (California): Woodbridge Press. 1986. 200 p.
164. Olesen J.E. , Schelde K., Weiske A., Weisbjerg M.R., Asman W.A.H. , Djurhuus J. Modelling greenhouse gas emissions from European conventional and organic dairy farms // *Agriculture, Ecosystems and Environment.* 2006. V. 112. P. 207-220.

165. Olk D.C., Gregorich E.G. Overview of the symposium proceedings, "Meaningful Pools in Determining Soil Carbon and Nitrogen Dynamics" // Soil Sci. Soc. Am. J. 2006. V. 70. № 3. P. 967-974.
166. Organic Farming Enhances Soil Fertility and Biodiversity: Results from a 21 Year Old Field Trial / Switzerland: Research Institute of Organic Agriculture (FiBL). Frick, 2000. Dossier №. 1. 96 p.
167. Qualls R.G., Bridgham S.D. Mineralization rate of ^{14}C -labelled dissolved organic matter from leaf litter in soils of a weathering chronosequence // Soil Biology and Biochem. 2005. V. 37. № 5. P. 905-916.
168. Schnitzer M., McArthur D.F.E., Schulten H.-R., Kozak L.M., Huang P.M. Long-term cultivation affects on the quantity and quality of organic matter in Selected Canadian prairie soils // Geoderma. 2006. V. 130. P. 141-156.
169. Scofield A. M. 1986. Organic farming—the origin of the name // Biological Agriculture and horticulture. 1986. V. 4. P. 1-5.
170. Six J., Conant R.T., Paul E.A., Paustian K. Stabilization mechanisms of soil organic matter: implications for C-saturation of soils // Plant Soil. 2002. V. 241. № 2. P. 155-176.
171. The World of Organic Agriculture. Statistics and Emerging Trends 2013 // International Federation of Organic Agriculture Movements (IFOAM) (Bonn, Germany) and Research Institute of Organic Agriculture (FiBL) (Frick, Switzerland). BioFach, 2013.
172. Trewavas A. A critical assessment of organic farming-and-food assertions with particular respect to the UK and the potential environmental benefits of no-till agriculture // Crop Protection. 2004. V. 23. № 9. P. 757-781.
173. Trewavas A. Urban myths of organic farming // Nature. 2001. V. 410. P. 409-410.
174. van Hees P.A.W., Jones D.L., Finlay R., Godbold D.L., Lundström U.S. The carbon we do not see – the impact of low molecular weight compounds on

carbon dynamics and respiration in forest soils: a review // Soil Biology and Biochem. 2005. V. 37. P. 1-13.

175. von Lützow M., Kögel-Knabner I., Ekschmitt K., Flessa H., Guggenberger G., Matzner E., Marschner B. SOM fractionation methods: Relevance to functional pools and to stabilization mechanisms // Soil Biology and Biochem. 2007. V. 39. № 9. P. 2183-2207.
176. von Lützow M., 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 // European J. Soil Sci. 2006. V. 57. № 4. P. 426-445.
177. von Lützow M., Kögel-Knabner I., Ludwig B., Matzner E., Flessa H., Ekschmitt K., Guggenberger G., Marschner B., Kalbitz K. Stabilization mechanisms of organic matter in four temperate soils: Development and application of a conceptual model // J. Plant Nutr. and Soil Sci. 2008. V. 171. № 1. P. 111-124.
178. Wander M.M., Traina S.J. Organic Matter Fractions from Organically and Conventionally Managed Soils: I. Carbon and Nitrogen Distribution // Soil Sci. Soc. Am. J. 1996. V. 60. № 4. P. 1081-1087.
179. Wander M.M., Traina S.J., Stinner B.R., Peters S.E. Organic and conventional management effects on biologically active soil organic matter pools // Soil Sci. Soc. Am. J. 1994. V. 58. № 4. P. 1130-1139.
180. Wang W.J., Dalal R.C., Moody P.W. Soil carbon sequestration and density distribution in a Vertisol under different farming practices // Australian J. of Soil Research. 2004. V. 42. P. 875–882.
181. Watson C. A., Walker R.L., Stockdale E.A. Research in organic production systems – past, present and future // J. of Agricultural Science. 2008. V. 146. P. 1-19.
182. Weiske A., Vabitsch A., Olesen J.E., Schelde K., Michel J., Friedrich R., Kaltschmitt M. Mitigation of greenhouse gas emissions in European

conventional and organic dairy farming // Agriculture, Ecosystems and Environment. 2006. V. 112. P. 221-232.

183. West T.O., Six J. Considering the influence of sequestration duration and carbon saturation on estimates of soil carbon capacity // Climatic Change. 2007. V. 80. № 1-2. P. 25-41.

184. Willer H., Yussefi M. The World of Organic Agriculture: Statistics and Emerging Trends, International Federation of Organic Agriculture Movements (IFOAM). Bonn, Germany. 2004. 167 p.

Приложение 1. Потенциальная и фактическая минерализация органического вещества почвы залежей и агроценозов с органической системой удобрения. Весенний отбор проб

№	Вариант	Содержание потенциально-минерализуемого углерода на начало инкубации			Продукция C-CO ₂ за период инкубации	
		мг/100 г	% от C _{орг}	Константа скорости минерализации, сут ⁻¹	мг/100 г	% от C _{орг}
1а	Залежь	87±1	6.7	0.042± 0.001	102±1	7.8
2а	Картофель	82±3	3.5	0.030± 0.001	96±3	4.0
1б	Залежь	163±7	5.9	0.035± 0.001	185±7	6.6
2б	Картофель	109±2	6.9	0.042± 0.000	126±2	8.0

Примечание. Подробная характеристика мест отбора почвы приведена в таблице 4.

Приложение 2. Потенциальная и фактическая минерализация органического вещества почвы залежей и агроценозов с минеральной системой удобрения. Весенний отбор проб

№	Вариант	Содержание потенциально-минерализуемого углерода на начало инкубации			Продукция C-CO ₂ за период инкубации	
		мг/100 г	% от C _{орг}	Константа скорости минерализации, сут ⁻¹	мг/100 г	% от C _{орг}
3а	Залежь	135±3	5.1	0.041± 0.003	155±5	9.6
4а	Озимая пшеница	70±1	4.4	0.043± 0.001	87±1	3.3
3б	Залежь	112±3	5.2	0.043± 0.001	131±4	6.0
4б	Ячмень	67±1	4.3	0.044± 0.002	83±1	5.4
3в	Залежь	130±4	7.4	0.039± 0.001	151±4	8.5
4в	Картофель	68±3	4.2	0.042± 0.001	83±4	5.1

Примечание. Подробная характеристика мест отбора почвы приведена в таблице 5.

Приложение 3. Потенциальная и фактическая минерализация органического вещества почвы залежей и агроценозов с минеральной системой удобрения культур, возделываемых по Миттлайдеру. Весенний отбор проб

№	Вариант	Содержание потенциально-минерализуемого углерода на начало инкубации			Продукция С-СО ₂ за период инкубации	
		мг/100 г	% от С _{орг}	Константа скорости минерализации, сут ⁻¹	мг/100 г	% от С _{орг}
5а	Залежь	86±1	6.3	0.036± 0.001	100±1	7.4
6а	Лук, гряды	55±0	3.5	0.041± 0.000	66±0	4.2
7а	Лук, междурядья	66±0	4.2	0.046± 0.000	81±0	5.1
6б	Картофель, гряды	42±1	3.3	0.038± 0.000	51±0	4.0
7б	Картофель, междурядья	68±0	4.8	0.040± 0.000	82±0	5.8
6в	Морковь, гряды	50±0	3.4	0.025± 0.002	57±2	3.9
7в	Морковь, междурядья	66±2	4.4	0.041± 0.000	80±3	5.3
6г	Капуста, гряды	45±1	5.0	0.038± 0.002	56±1	6.2
7г	Капуста, междурядья	53±1	4.9	0.053± 0.001	66±1	6.1

Примечание. Подробная характеристика мест отбора почвы приведена в таблице 6.

Приложение 4. Потенциальная и фактическая минерализация органического вещества почвы залежей и агроценозов с органо-минеральной системой удобрения. Весенний отбор проб

№	Вариант	Содержание потенциально-минерализуемого углерода на начало инкубации			Продукция С-СО ₂ за период инкубации	
		мг/100 г	% от С _{орг}	Константа скорости минерализации, сут ⁻¹	мг/100 г	% от С _{орг}
8а	Залежь	138±3	8.3	0.029± 0.000	153±3	9.2
9а	Яровая пшеница	68±1	5.6	0.036± 0.000	82±1	6.8
8б	Залежь	132±3	8.7	0.027± 0.000	145±2	9.5
9б	Многолетние травы	72±4	5.4	0.032± 0.001	86±4	6.4
8в	Залежь	127±1	6.7	0.025± 0.000	139±1	7.3
9в	Кукуруза на силос	69±1	4.3	0.036± 0.001	82±1	5.2

Примечание. Подробная характеристика мест отбора почвы приведена в таблице 7.

Приложение 5. Потенциальная и фактическая минерализация органического вещества почвы залежей и агроценозов с органической системой удобрения. Осенний отбор проб

№	Вариант	Содержание потенциально-минерализуемого углерода на начало инкубации			Продукция С-СО ₂ за период инкубации	
		мг/100 г	% от С _{орг}	Константа скорости минерализации, сут ⁻¹	мг/100 г	% от С _{орг}
1а	Залежь	88±2	6.0	0.032± 0.000	99±3	6.8
2а	Картофель	80±1	3.6	0.030± 0.000	90±1	4.1
1б	Залежь	154±3	6.5	0.027± 0.000	170±3	7.1
2б	Картофель	96±2	5.0	0.049± 0.001	112±3	5.8

Примечание. Подробная характеристика мест отбора почвы приведена в таблице 4.

Приложение 6. Потенциальная и фактическая минерализация органического вещества почвы залежей и агроценозов с минеральной системой удобрения. Осенний отбор проб

№	Вариант	Содержание потенциально-минерализуемого углерода на начало инкубации			Продукция С-СО ₂ за период инкубации	
		мг/100 г	% от С _{орг}	Константа скорости минерализации, сут ⁻¹	мг/100 г	% от С _{орг}
3а	Залежь	153±0	6.8	0.022± 0.000	166±1	7.4
4а	Озимая пшеница	69±0	4.4	0.035± 0.000	79±1	5.1
3б	Залежь	102±2	4.9	0.035± 0.000	118±3	5.6
4б	Ячмень	66±0	3.9	0.032± 0.000	76±0	4.5
3в	Залежь	165±10	8.3	0.030± 0.000	182±10	9.1
4в	Картофель	67±0	4.2	0.033± 0.000	77±0	4.8

Примечание. Подробная характеристика мест отбора почвы приведена в таблице 5.

Приложение 7. Потенциальная и фактическая минерализация органического вещества почвы залежей и агроценозов с органо-минеральной системой удобрения. Осенний отбор проб

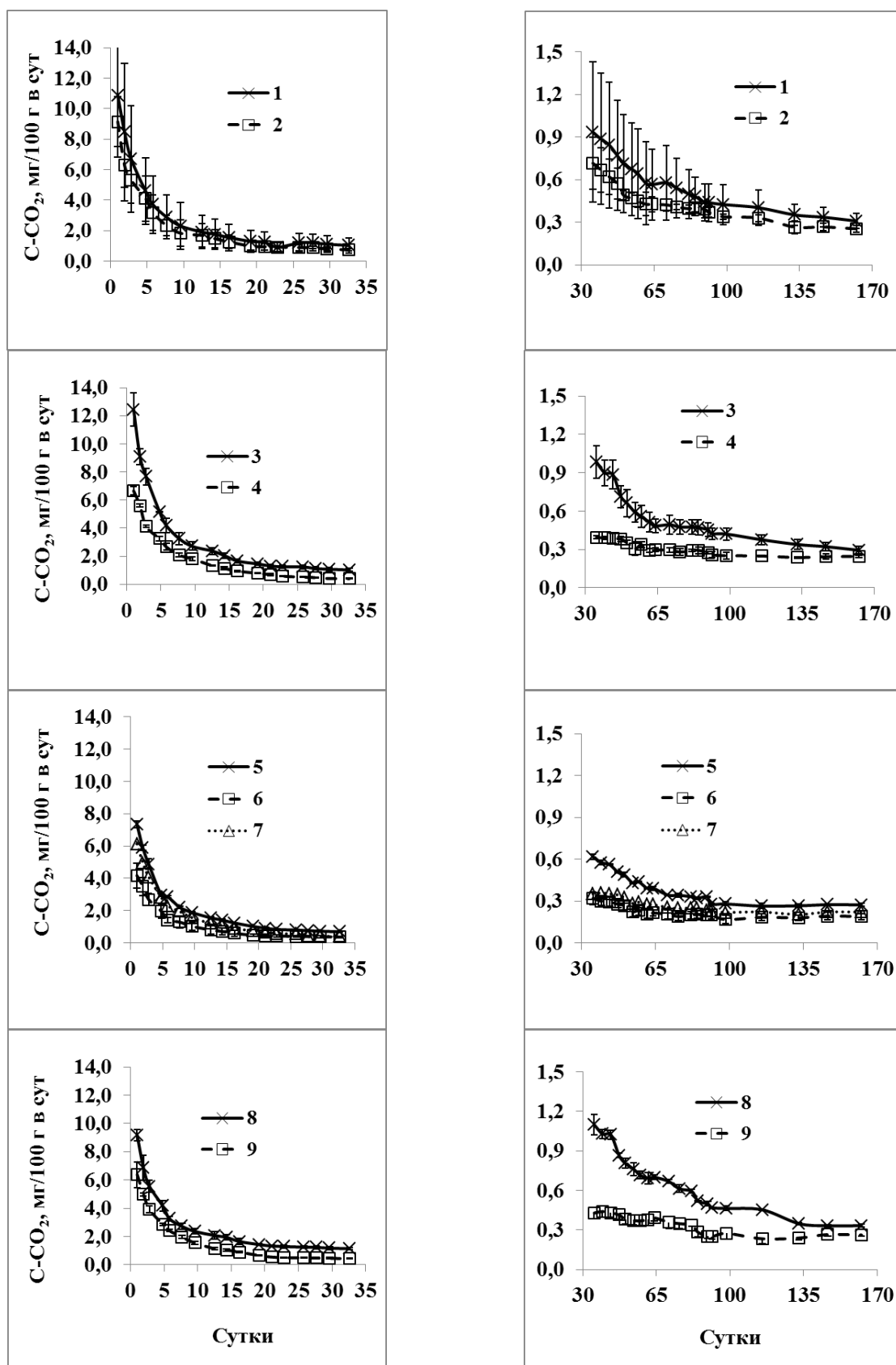
№	Вариант	Содержание потенциально-минерализуемого углерода на начало инкубации			Продукция С-СО ₂ за период инкубации	
		мг/100 г	% от С _{орг}	Константа скорости минерализации, сут ⁻¹	мг/100 г	% от С _{орг}
8а	Залежь	155±4	8.0	0.020± 0.000	165±4	8.5
9а	Яровая пшеница	71±1	5.1	0.023± 0.001	77±1	5.5
8б	Залежь	147±2	10.3	0.019± 0.000	153±2	10.7
9б	Многолетние травы	87±3	6.8	0.022± 0.000	94±3	7.3
8в	Залежь	130±2	7.0	0.023± 0.000	141±2	7.6
9в	Кукуруза на силос	70±0	4.7	0.024± 0.000	77±0	5.2

Примечание. Подробная характеристика мест отбора почвы приведена в таблице 7.

Приложение 8. Потенциальная и фактическая минерализация органического вещества почвы залежей и агроценозов с минеральной системой удобрения культур, возделываемых по Миттлайдеру. Осенний отбор проб

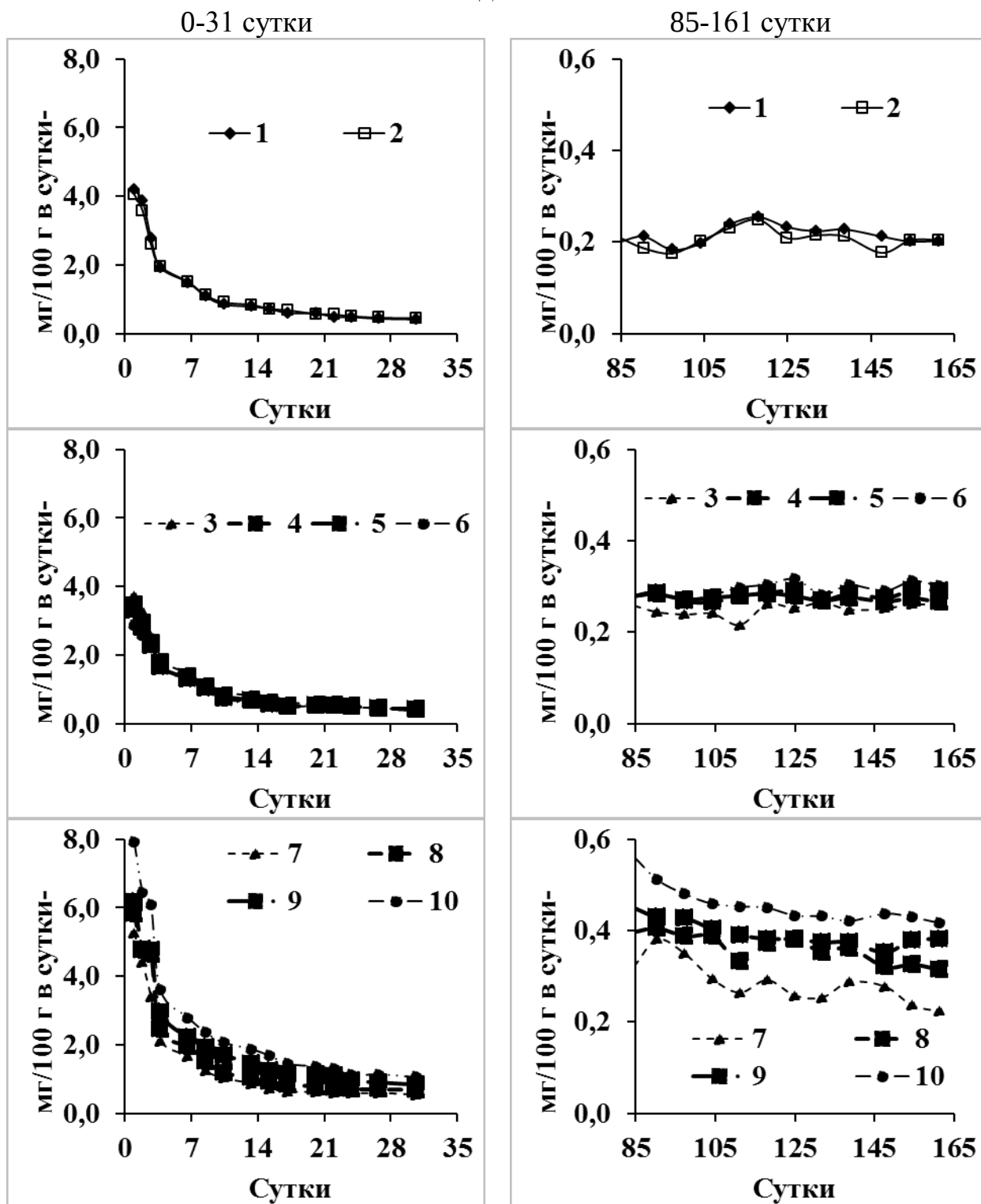
№	Вариант	Содержание потенциально-минерализуемого углерода на начало инкубации			Продукция C-CO ₂ за период инкубации	
		мг/100 г	% от C _{орг}	Константа скорости минерализации, сут ⁻¹	мг/100 г	% от C _{орг}
5а	Залежь	112±2	5.6	0.035± 0.001	127±2	6.3
6а	Лук, гряды	53±0	4.0	0.020± 0.000	56±1	4.3
7а	Лук, междурядья	77±2	4.9	0.021± 0.000	81±2	5.2
6б	Картофель, гряды	41±1	3.4	0.021± 0.001	45±1	3.8
7б	Картофель, междурядья	65±2	4.8	0.022± 0.000	69±2	5.1
6в	Морковь, гряды	46±2	3.5	0.026± 0.001	52±2	3.9
7в	Морковь, междурядья	62±1	4.1	0.025± 0.000	68±2	4.5
6г	Капуста, гряды	46±0	4.1	0.027± 0.001	52±0	4.6
7г	Капуста, междурядья	62±6	4.8	0.022± 0.003	68±5	5.3

Примечание. Подробная характеристика мест отбора почвы приведена в таблице 6.



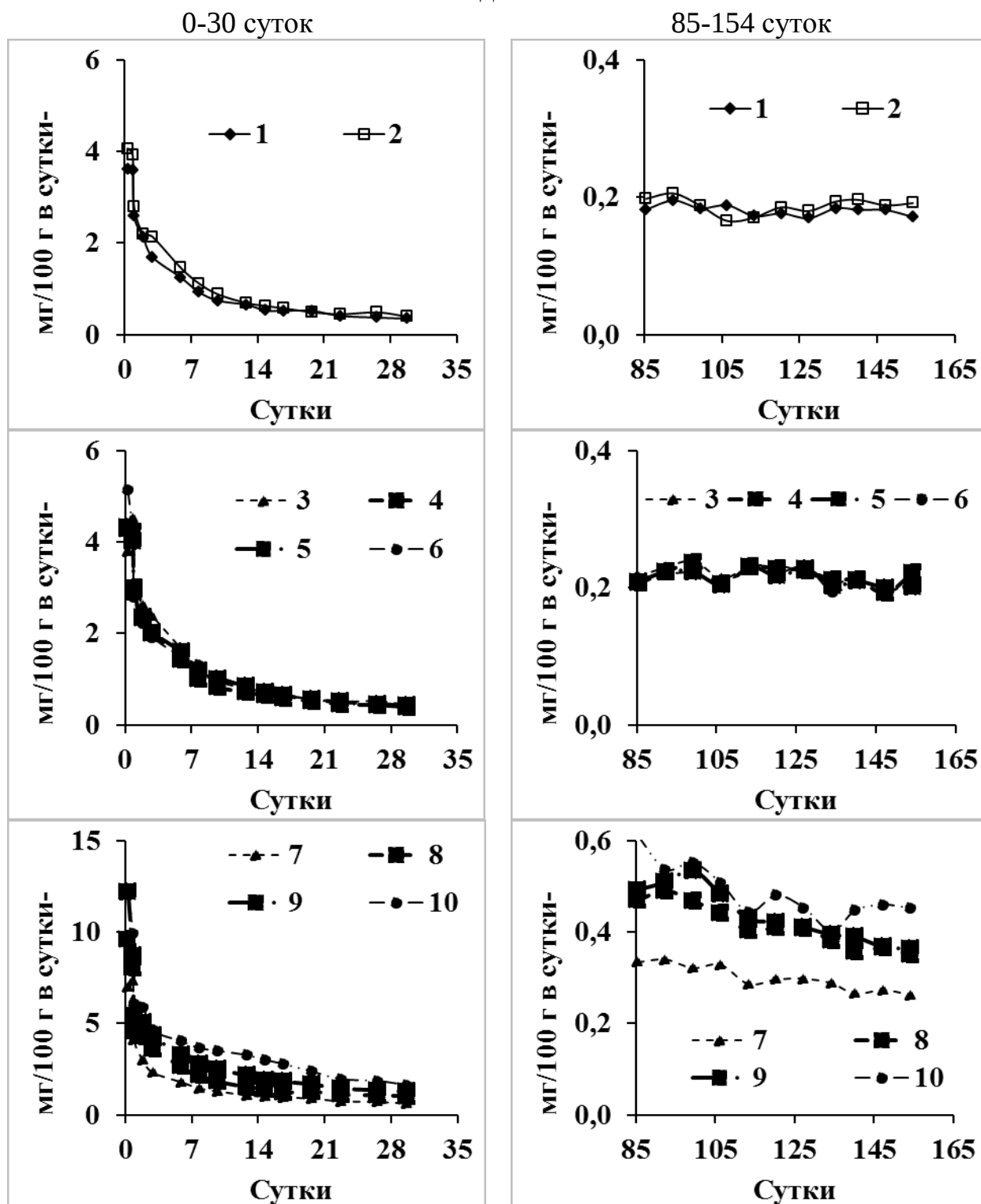
Приложение 9. Динамика продуцирования C-CO₂ почвой под залежью и пашней с разными системами удобрения (весенний отбор проб). Залежь – 1, 3, 5, 8. Пашня – 2, 4, 6 (гряды), 7 (межгрядья), 9. Подробное описание вариантов 5-9 приведено в табл. 4-7.

1- год опыта



Приложение 10. Интенсивность выделения C-CO₂ серой лесной почвой в течение длительной ее инкубации. Варианты: 1 – Чистый пар, 2 – Без удобрений (контроль), 3 – (NPK)1, 4 – (NPK)2, 5 – (NPK)3, 6 – (NPK)4, 7 – Навоз 25 т/га, 8 – Навоз 50 т/га, 9 – Навоз 75 т/га, 10 – Навоз 100 т/га.

2- год опыта



Приложение 11. Интенсивность выделения $C-CO_2$ серой лесной почвой в течение длительной ее инкубации. Варианты: 1 – Чистый пар, 2 – Без удобрений (контроль), 3 – (NPK)1, 4 – (NPK)2, 5 – (NPK)3, 6 – (NPK)4, 7 – Навоз 25 т/га, 8 – Навоз 50 т/га, 9 – Навоз 75 т/га, 10 – Навоз 100 т/га.

Приложение 12. Сравнение содержания $C_{\text{орг}}$ в серой лесной почве при весеннем и осеннем отборе проб по t_{05} -тесту

Вариант	Разница средних	t_{05}	P	Разница существенна (+), не существенна (–)
1. Залежь (контроль варианту 2)	0,125	0,250	0,810	–
2. Органическая система	-0,085	-0,341	0,745	–
3. Залежь (контроль варианту 4)	0,100	0,571	0,580	–
4. Минеральная система	-0,018	-0,258	0,802	–
5. Залежь (контроль вариантам 6 и 7)	-0,665	-3,896	0,060	–
6. Минеральная по Миттлайдеру (гряды)	0,062	0,574	0,575	–
7. То же (межгрядья)	-0,035	-0,383	0,707	–
8. Залежь (контроль варианту 9)	-0,047	-0,370	0,719	–
9. Органо-минеральная система	-0,010	-0,091	0,930	–

Приложение 13. Сравнение содержания N_{tot} в серой лесной почве при весеннем и осеннем отборе проб по t_{05} -тесту

Вариант	Разница средних	t_{05}	P	Разница существенна (+), не существенна (–)
1. Залежь (контроль варианту 2)	24,457	1,928	0,102	–
2. Органическая система	31,155	1,916	0,103	–
3. Залежь (контроль варианту 4)	14,681	1,969	0,077	–
4. Минеральная система	2,916	0,461	0,654	–
5. Залежь (контроль вариантам 6 и 7)	3,485	0,226	0,842	–
6. Минеральная по Миттлайдеру (гряды)	14,542	5,212	0,000	+
7. То же (межгрядья)	2,86	0,985	0,341	–
8. Залежь (контроль варианту 9)	15,936	2,301	0,044	+
9. Органо-минеральная система	1,795	0,452	0,660	–

Приложение 14. Сравнение содержания $N_{\min}$ в серой лесной почве при весеннем и осеннем отборе проб по t_{05} -тесту

Вариант	Разница средних	t_{05}	P	Разница существенна (+), не существенна (–)
1. Залежь (контроль варианту 2)	0,407	1,537	0,174	–
2. Органическая система	1,437	4,383	0,004	+
3. Залежь (контроль варианту 4)	0,968	9,076	0,000	+
4. Минеральная система	1,316	16,797	0,000	+
5. Залежь (контроль вариантам 6 и 7)	1,590	14,450	0,004	+
6. Минеральная по Миттлайдеру (гряды)	2,195	7,040	0,000	+
7. То же (межгрядья)	2,605	15,738	0,000	+
8. Залежь (контроль варианту 9)	1,595	16,542	0,000	+
9. Органо-минеральная система	1,486	6,840	0,000	+

Приложение 15. Сравнение содержания P_2O_5 в серой лесной почве при весеннем и осеннем отборе проб по t_{05} -тесту

Вариант	Разница средних	t_{05}	P	Разница существенна (+), не существенна (–)
1. Залежь (контроль варианту 2)	-0,232	-0,229	0,826	–
2. Органическая система	1,245	0,199	0,848	–
3. Залежь (контроль варианту 4)	-1,206	-2,275	0,046	+
4. Минеральная система	4,458	6,030	0,000	+
5. Залежь (контроль вариантам 6 и 7)	2,185	3,134	0,088	–
6. Минеральная по Миттлайдеру (гряды)	-1,342	-0,310	0,761	–
7. То же (межгрядья)	5,630	2,371	0,032	+
8. Залежь (контроль варианту 9)	3,026	4,083	0,002	+
9. Органо-минеральная система	-0,251	-0,085	0,933	–

Приложение 16. Сравнение содержания K_2O в серой лесной почве при весеннем и осеннем отборе проб по t_{05} -тесту

Вариант	Разница средних	t_{05}	P	Разница существенна (+), не существенна (–)
1. Залежь (контроль варианту 2)	-1,475	-0,643	0,543	–
2. Органическая система	6,30	1,896	0,106	–
3. Залежь (контроль варианту 4)	0,316	0,857	0,411	–
4. Минеральная система	5,508	8,467	0,000	+
5. Залежь (контроль вариантам 6 и 7)	-2,7	-17,84	0,003	+
6. Минеральная по Миттлайдеру (гряды)	4,412	2,130	0,051	–
7. То же (межгрядья)	-0,950	-1,008	0,330	–
8. Залежь (контроль варианту 9)	-3,683	-7,639	0,000	+
9. Органо-минеральная система	-5,516	-7,787	0,000	+

Приложение 17. Сравнение содержания рН в серой лесной почве при весеннем и осеннем отборе проб по t_{05} -тесту

Вариант	Разница средних	t_{05}	P	Разница существенна (+), не существенна (–)
1. Залежь (контроль варианту 2)	-0,480	-1,603	0,159	–
2. Органическая система	0,242	1,217	0,269	–
3. Залежь (контроль варианту 4)	0,158	1,089	0,301	–
4. Минеральная система	0,283	2,832	0,017	+
5. Залежь (контроль вариантам 6 и 7)	0,445	29,666	0,001	+
6. Минеральная по Миттлайдеру (гряды)	-0,172	-1,047	0,312	–
7. То же (межгрядья)	-0,031	-0,145	0,886	–
8. Залежь (контроль варианту 9)	0,158	0,983	0,348	–
9. Органо-минеральная система	0,335	2,569	0,027	+

Приложение 18. Сравнение содержания Нг в серой лесной почве при весеннем и осеннем отборе проб по t_{05} -тесту

Вариант	Разница средних	t_{05}	P	Разница существенна (+), не существенна (–)
1. Залежь (контроль варианту 2)	3,730	8,789	0,000	+
2. Органическая система	-0,072	-0,541	0,607	–
3. Залежь (контроль варианту 4)	0,270	2,155	0,056	–
4. Минеральная система	1,066	2,107	0,061	–
5. Залежь (контроль вариантам 6 и 7)	-1,860	-29,40	0,001	+
6. Минеральная по Миттлайдеру (гряды)	1,896	4,214	0,000	+
7. То же (межгрядья)	1,333	3,489	0,003	+
8. Залежь (контроль варианту 9)	1,611	2,428	0,035	+
9. Органо-минеральная система	0,223	0,790	0,447	–

Приложение 19. Сравнение содержания $C_{\text{раст}}$ в серой лесной почве при весеннем и осеннем отборе проб по t_{05} -тесту

Вариант	Разница средних	t_{05}	P	Разница существенна (+), не существенна (–)
1. Залежь (контроль варианту 2)	5,417	8,739	0,000	+
2. Органическая система	6,525	8,616	0,000	+
3. Залежь (контроль варианту 4)	7,535	11,439	0,000	+
4. Минеральная система	13,33	30,748	0,000	+
5. Залежь (контроль вариантам 6 и 7)	4,10	15,810	0,003	+
6. Минеральная по Миттлайдеру (гряды)	12,393	12,396	0,000	+
7. То же (межгрядья)	14,927	19,041	0,000	+
8. Залежь (контроль варианту 9)	2,791	2,688	0,022	+
9. Органо-минеральная система	5,216	5,575	0,000	+

Приложение 20. Сравнение содержания C_0 (потенциально-минерализуемого), в серой лесной почве при весеннем и осеннем отборе проб по t_{05} -тесту

Вариант	Разница средних	t_{05}	P	Разница существенна (+), не существенна (–)
1. Залежь (контроль варианту 2)	4,505	0,155	0,881	–
2. Органическая система	7,257	0,806	0,450	–
3. Залежь (контроль варианту 4)	-14,089	-1,077	0,306	–
4. Минеральная система	1,498	1,564	0,148	–
5. Залежь (контроль вариантам 6 и 7)	-26,42	-17,06	0,003	+
6. Минеральная по Миттлайдеру (гряды)	1,377	0,568	0,578	–
7. То же (межгрядья)	-3,042	-0,899	0,383	–
8. Залежь (контроль варианту 9)	-11,438	-2,174	0,054	–
9. Органо-минеральная система	-6,245	-1,728	0,114	–

Приложение 21. Сравнение содержания $C_{мб.}$ в серой лесной почве при весеннем и осеннем отборе проб по t_{05} -тесту

Вариант	Разница средних	t_{05}	P	Разница существенна (+), не существенна (–)
1. Залежь (контроль варианту 2)	3,242	0,341	0,744	–
2. Органическая система	-14,085	-1,218	0,268	–
3. Залежь (контроль варианту 4)	-1,95	-0,749	0,471	–
4. Минеральная система	7,781	1,869	0,091	–
5. Залежь (контроль вариантам 6 и 7)	-43,79	-29,72	0,001	+
6. Минеральная по Миттлайдеру (гряды)	8,528	3,420	0,004	+
7. То же (межгрядья)	10,895	4,007	0,001	+
8. Залежь (контроль варианту 9)	-0,64	-0,214	0,834	–
9. Органо-минеральная система	13,593	5,575	0,000	+

Приложение 22. Сравнение содержания $C_{\text{акт.}}$ в серой лесной почве при весеннем и осеннем отборе проб по t_{05} -тесту

Вариант	Фракция	Разница средних	t_{05}	P	Разница существенна (+), не существенна (–)
1. Залежь (контроль варианту 2)	C_1	5,45	1,375	0,218	–
	C_2	20,057	1,703	0,139	–
	C_3	-54,697	-2,515	0,045	+
2. Органическая система	C_1	-12,702	-1,89	0,107	–
	C_2	14,22	5,079	0,002	+
	C_3	-3,735	-,158	0,879	–
3. Залежь (контроль варианту 4)	C_1	1,038	0,787	0,449	–
	C_2	16,133	2,323	0,042	+
	C_3	-127,145	-4,016	0,002	+
4. Минеральная система	C_1	7,953	9,461	0,000	+
	C_2	нет	нет	нет	нет
	C_3	11,373	2,428	0,035	+
5. Залежь (контроль вариантам 6 и 7)	C_1	-18,215	-72,38	0,000	+
	C_2	20,61	13,873	0,005	+
	C_3	30,105	1,715	0,228	–
6. Минеральная по Миттлайдеру (гряды)	C_1	6,541	3,297	0,005	+
	C_2	нет	нет	нет	нет
	C_3	-2,407	-0,531	0,603	–
7. То же (межгрядья)	C_1	13,936	12,402	0,000	+
	C_2	нет	нет	нет	нет
	C_3	-11,237	-2,302	0,037	+
8. Залежь (контроль варианту 9)	C_1	6,21	6,883	0,000	+
	C_2	12,44	5,214	0,000	+
	C_3	-137,73	-4,930	0,000	+
9. Органо-минеральная система	C_1	6,905	5,925	0,000	+
	C_2	нет	нет	нет	нет
	C_3	-9,255	-1,290	0,225	–

Приложение 23. Сравнение содержания $C_{\text{подв.}}$ в серой лесной почве при весеннем и осеннем отборе проб по t_{05} -тесту

Вариант	Разница средних	t_{05}	P	Разница существенна (+), не существенна (–)
1. Залежь (контроль варианту 2)	0,032	1,468	0,192	–
2. Органическая система	0,044	0,821	0,442	–
3. Залежь (контроль варианту 4)	0,059	1,035	0,324	–
4. Минеральная система	0,053	1,854	0,093	–
5. Залежь (контроль вариантам 6 и 7)	-0,012	-3,896	-0,277	–
6. Минеральная по Миттлайдеру (гряды)	-0,030	-1,681	0,114	–
7. То же (межгрядья)	Не опр.	Не опр.	Не опр.	Не опр.
8. Залежь (контроль варианту 9)	-0,071	-2,823	0,018	+
9. Органо-минеральная система	-0,028	-2,122	0,059	–

Приложение 24. Фактические и прогнозируемые величины содержания активного (C_0) органического вещества в серой лесной почве

№ п/п	Весна			Осень		
	$C-CO_2$ за 20 суток, мг/100 г	Фактические значения C_0 , мг/100 г	Расчетные по уравнению 6 значения C_0 , мг/100 г	$C-CO_2$ за 20 суток, мг/100 г	Фактические значения C_0 , мг/100 г	Расчетные по уравнению 6 значения C_0 , мг/100 г
1	70 ± 21	125 ± 44	134 ± 39	62 ± 17	121 ± 38	118 ± 31
2	53 ± 14	96 ± 15	102 ± 26	52 ± 12	88 ± 9	100 ± 23
3	73 ± 5	126 ± 11	140 ± 9	70 ± 13	140 ± 30	133 ± 24
4	43 ± 2	68 ± 2	82 ± 3	69 ± 1	133 ± 1	131 ± 2
5	48 ± 1	86 ± 1	93 ± 2	61 ± 0	112 ± 2	117 ± 1
6	26 ± 4	48 ± 5	53 ± 8	21 ± 4	47 ± 5	42 ± 8
7	40 ± 3	63 ± 6	77 ± 5	28 ± 2	66 ± 7	56 ± 5
8	62 ± 4	132 ± 5	118 ± 8	60 ± 3	144 ± 12	115 ± 5
9	39 ± 1	69 ± 3	75 ± 3	33 ± 4	76 ± 8	65 ± 7

Примечание: Номера вариантов те же, что и в приложении 22.

Разница фактических и расчетных средних -0.168, P value = 0.973, t_{05} = - 0.034