

На правах рукописи

*А. Мисенин*

**ЗИНЯКОВА НАТАЛЬЯ БОРИСОВНА**

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

**06.01.04 – агрохимия**

**АВТОРЕФЕРАТ**

**диссертации на соискание учёной степени  
кандидата биологических наук**

**Москва 2014**

Диссертационная работа выполнена в лаборатории почвенных циклов азота и углерода Института физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН (ИФХиБПП РАН)

**Научный руководитель:** **Семенов Вячеслав Михайлович**,  
доктор биологических наук, главный  
научный сотрудник ФГБУН ИФХиБПП  
РАН

**Официальные оппоненты:** **Шевцова Людмила Константиновна**,  
доктор биологических наук, профессор,  
главный научный сотрудник ГНУ ВНИИ  
агрохимии имени Д.Н.Прянишникова  
Россельхозакадемии

**Русакова Ирина Викторовна**, кандидат  
биологических наук, заместитель  
директора по научной работе ГНУ ВНИИ  
органических удобрений и торфа  
Россельхозакадемии

**Ведущее учреждение:** ГНУ Почвенный институт имени  
В.В.Докучаева Россельхозакадемии

Защита диссертации состоится «24» февраля 2015 года в 15 час 30 мин в аудитории М-2 на заседании Диссертационного совета Д 501.002.13 при Московском государственном университете имени М.В. Ломоносова по адресу: 119991, Москва, ГСП-1, Ленинские горы, корпус Д. 1, стр.12, Факультет почвоведения. Тел/Факс: (495)9392947 E-mail: main@soil.msu.ru

С диссертацией можно ознакомиться в Фундаментальной библиотеке МГУ имени М.В. Ломоносова (Ломоносовский проспект, 27, отдел диссертаций) и на сайте <http://soil.msu.ru>

Автореферат разослан «\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2014 г.

Приглашаем Вас принять участие в обсуждении диссертации на заседании Диссертационного совета. Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью организации, просьба направлять по адресу: 119991, ГСП-1, Москва, Ленинские горы, МГУ имени М.В.Ломоносова, корпус 1, стр.12, Факультет почвоведения, Учёному секретарю диссертационного совета.

Учёный секретарь  
диссертационного совета Д 501.002.13,  
доктор биологических наук,  
профессор

Зенова Галина Михайловна

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность проблемы.** Современные системы земледелия направлены на комплексное решение задач по производству растениеводческой продукции в объемах достаточных для обеспечения населения полноценным и безопасным питанием, поддержанию стабильности производственного процесса и его устойчивости к глобальным изменениям природной среды и климата, уменьшению объемов эмиссии парниковых газов в атмосферу и повышению углеродсеквестрирующего потенциала агроэкосистем, сохранению биогеоэкологических и агропроизводственных функций почвы. Эти приоритеты в наибольшей мере свойственны адаптивно-ландшафтной системе земледелия, получившей распространение в России [Агроэкологическая оценка земель..., 2005], и органической (биологической) системе земледелия [The World of Organic Agriculture..., 2013], используемой во многих странах мира.

Если традиционные и адаптивно-ландшафтные системы земледелия в зависимости от степени их биологизации базируются на полном или частичном применении минеральных удобрений (минеральная и органо-минеральная системы удобрения) и иных агрохимикатов, то в органическом земледелии используются только органические удобрения и биологические способы защиты растений. 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]. Однако вопрос, какая из систем в наибольшей мере отвечает требованию воспроизводства почвенного органического вещества (ПОВ) и улучшения его качества продолжает оставаться актуальным [Лыков, 1982; Романенков и др., 2009; Шарков, Данилова, 2010; Шарков, 2011; Когут, 2011; Edmeades, 2003; Marriott, Wander, 2006; Ghosh et al, 2010 и др.].

Влияние систем удобрения полевых культур на содержание и качество ПОВ наиболее часто оценивается по валовому содержанию органического углерода ( $C_{org}$ ) и фракционно-групповому составу гумуса, количеству подвижных и лабильных фракций в его составе (Ганжара, 1998; Когут, 2003; Шевцова, 2009; Завьялова, Кончиц, 2011; Овчинникова, 2012; Шевцова и др., 2012). Менее известными остаются вопросы влияния разных систем удобрения на активный пул ПОВ, к которому относятся химически и физически незащищенные компоненты высокого энергетического и питательного статуса, способные к (био)химическим превращениям со временем существования от менее 3-х до 10 лет [Семенов, Тулина, 2011]. Представляется важным исследовать влияние минеральных и органических удобрений на размеры и структуру активного пула ПОВ, ответственного за краткосрочную динамику многих биологических, физических и агрохимических свойств почвы.

**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 органического вещества (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<sub>2</sub> 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  $C_{орг}$  или вносимого с удобрением органического материала.

**Апробация работы.** Основные результаты диссертационной работы были лично доложены на Международной научно-практической конференции «Почвенно-земельные ресурсы: оценка, устойчивое использование, геоинформационное обеспечение» (Минск, 2012), Всероссийской научно-практической конференции «Биологизация адаптивно-ландшафтной системы земледелия – основа повышения плодородия почвы, роста продуктивности сельскохозяйственных культур и сохранения окружающей среды» (Белгород, 2012), Всероссийской научно-практической конференции с международным участием «Системы использования органических удобрений и возобновляемых ресурсов в ландшафтном земледелии» (Владимир, 2013), Международной научной конференции, посвященной 105-летию Л.Н.Александровой (Санкт-Петербург-Пушкин, 2013) и представлены на Международной научной конференции «Наследие И.В.Тюрина в современных исследованиях в почвоведении» (Казань, 2013).

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 9 работ, в том числе 3 в изданиях, рекомендованных ВАК.

**Объём и структура диссертации.** Диссертация включает введение, обзор литературы, описание объектов и методов исследования, обсуждение экспериментальных результатов, выводы, список литературы и приложения. Материалы диссертации изложены на 167 страницах, содержат 20 таблиц, 21 рисунок, 24 приложения. Список литературы включает 184 наименований, в том числе 66 англоязычных.

**Поддержка и 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.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

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

В четырёх разделах главы рассмотрены основные принципы органического земледелия и мировые тенденции его развития, проведен сравнительный анализ влияния органической и традиционной систем

земледелия на урожай культур и качество продукции. Отмечено, что 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 способом производства сельскохозяйственной продукции. Выявлены особенности влияния разных системах удобрения на питательный режим почв, баланс питательных элементов, биологические параметры почвы и биоразнообразия. 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. Показано, что одним из главных преимуществ органической системы удобрения по сравнению с минеральной системой является стабильное сохранение и устойчивое воспроизводство ПОВ. Подчеркивается перспективность исследований влияния систем удобрения и агротехнологий разной интенсивности на качество почвенного органического вещества и его функции.

## **ГЛАВА 2. ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ**

Исследования выполнены на среднесуглинистой серой лесной почве, залегающей на территории Заокского р-на Тульской обл. (пос. Заокский, д. Болотово, д. Дворяниново, с. Ненашево) и южной части Серпуховского р-на Московской обл. (г. Пушино). 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), четыре участка с интенсивным минеральным удобрением под овощные культуры (лук репчатый, картофель, морковь, капуста), возделываемые по методу Миттлайдера. Контролем для каждой системы удобрения служили участки под залежью с возрастом свыше 15 лет, расположенные на расстоянии 50-200 м от посевов. Продолжительность использования органической системы удобрения (25-50 т/га навоза КРС ежегодно) составляла 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. Образцы почвы отбирались весной до посева и осенью после уборки урожая культур из слоя 0-20 см в двадцати разных местах пахотных участков через 5-10 м между точками и в десяти точках залежей, расположенных рядом с посевами.

Исследование влияния ежегодного внесения возрастающих доз минеральных и органических удобрений на содержание и качество органического вещества серой лесной почвы проводили в микрополевым опыте в сосудах без дна площадью 0,25 м<sup>2</sup>. Опыт проводился по схеме: 1) Чистый пар, 2) Без удобрений (контроль), 3) N1P1K1, 4) N2P2K2, 5) N3P3K3, 6) N4P4K4, 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 – N90P75K75 кг/га. В качестве удобрений использовали  $N_m$ ,  $P_c$ ,  $K_c$ , свежий навоз КРС (сухое вещество 20.4%,  $C_{орг}$  и  $N_{общ}$  – 35.5 и 1.73% на сухое вещество), которые смешивали с 0-20 см слоем до посева культур. Количества поступающего с навозом КРС азота были практически эквивалентны дозам минеральных удобрений, калия – несколько больше, а фосфора – меньше. В 1-й год опыта возделывали сахарную свеклу, во 2-й год – кукурузу. Повторность опыта трехкратная. Образцы почвы отбирались после уборки урожая из слоя 0-20 см.

Определение активного пула ОВ и его структуры производили путем суточного прогревания при температуре 65°C образцов почвы и последующей их инкубации в течение 150-163 суток при влажности 25% от массы почвы и температуре 22°C с количественным учетом выделяющегося С-СО<sub>2</sub> на газовом хроматографе Кристалл-Люкс-4000М [Семенов и др., 2006; Семенов и др. 2008]. Расчет содержания активного (потенциально-минерализуемого) углерода органического вещества ( $C_0$ ) в почве на момент начала инкубации производили по кумулятивному количеству С-СО<sub>2</sub>, выделившегося за все время инкубации (ур-ние 1). Аппроксимируя полученные в динамике кумулятивные количества С-СО<sub>2</sub> трехкомпонентным уравнением экспоненциальной регрессии (ур-ние 2), вычисляли содержание углерода легко ( $C_1$ ,  $k_1 > 0.1$  сут<sup>-1</sup>), умеренно ( $C_2$ ,  $0.1 < k_2 > 0.01$  сут<sup>-1</sup>) и трудно минерализуемых ( $C_3$ ,  $0.01 < k_3 > 0.001$  сут<sup>-1</sup>) фракций активного пула ПОВ. При недостоверных коэффициентах трехкомпонентной модели использовали двухкомпонентное уравнение 3, выделяя в этом случае легко и трудно минерализуемые фракции ПОВ.

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

$$C_t = C_1 \cdot (1 - \exp(-k_1 \cdot t)) + C_2 \cdot (1 - \exp(-k_2 \cdot t)) + C_3 \cdot (1 - \exp(-k_3 \cdot t)) \quad (2),$$

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

где:  $C_t$  – кумулятивное количество С-СО<sub>2</sub> (мг/100 г почвы) за время  $t$  (сутки);

$C_0$  – активный (потенциально минерализуемый) углерод ПОВ (мг/100 г);

$C_1$ ,  $C_2$ ,  $C_3$  – легко, умеренно и трудно минерализуемые фракции ПОВ (мг/100 г);

$k...k_3$  – константы скорости минерализации ПОВ (сутки<sup>-1</sup>).

Углеродминерализующую активность (УА) почвы оценивали по индексу, полученному умножением содержания потенциально-минерализуемого углерода на константу скорости минерализации ( $УА = C_0 \cdot k$ , мг/100 г в сутки). 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 1-3 с уровнем значимости  $P > 0.05$  отвергались. Физико-химические свойства почвы (гранулометрический состав,  $Ca^{2+} + Mg^{2+}$ ,  $pH_{KCl}$ ,  $H_T$ ,  $N_{общ}$ ,  $N_{мин}$  ( $N-NH_4^+_{обм} + N-NO_3^-$ ), подвижные  $P_2O_5$  и  $K_2O$ ) определяли классическими методами. Содержание валового и подвижного (0.1 н. NaOH)  $C_{орг}$  в почве определяли по Тюрину. Фракцию растворенного углерода, извлекаемого 0.5 н.  $K_2SO_4$ , определяли колориметрическим методом, используя в качестве шкалы разные концентрации глюкозы.

Дисперсионный и регрессионный анализ данных, расчет коэффициентов корреляции и графическую иллюстрацию экспериментального материала проводили с помощью 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**

Серая лесная почва залежей имела кислый или слабокислый pH, тогда как под посевами – от слабокислого при применении минеральных удобрений, до нейтрального с органической системой удобрения. В отличие от залежей пахотная почва характеризовалась существенно меньшей гидролитической кислотностью, особенно при органической системе удобрения. По обеспеченности подвижными формами фосфора и калия пахотная почва соответствовала среднему уровню окультуренности. В почве с органической системой удобрения не обнаруживался недостаток подвижного фосфора, как это часто бывает в условиях органического земледелия. При органической системе удобрения происходило обогащение почвы  $N_{\text{общ}}$  по сравнению с залежами, тогда как при минеральном и органо-минеральном удобрении – обеднение. Наоборот, систематическое применение минеральных удобрений создавало повышенный фон обеспеченности почвы  $N_{\text{мин}}$ .

Применение возрастающих доз минеральных и органических удобрений способствовало быстрому изменению агрохимических показателей серой лесной почвы. В среднем за два года pH почвы в вариантах с минеральными удобрениями снизился на 0.34-0.92 по сравнению с исходным состоянием до закладки опыта. Чем выше была доза NPK, тем существеннее подкислялась почва. При внесении навоза значения pH почвы возрастали, особенно при высоких дозах. По сравнению с исходными показателями содержание  $K_2O$  и  $P_2O_5$  в серой лесной почве после первого и второго года увеличивалось 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. 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.

Содержание  $C_{\text{орг}}$  в серой лесной 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. В почве с органической системой удобрения содержалось практически столько же  $C_{\text{орг}}$ , что и под залежью, а при минеральной и органо-минеральной системах удобрения – в 1.1-1.7 раз меньше. В микрополевым опыте после первого года внесения органических удобрений содержание  $C_{\text{орг}}$  в почве возросло относительно исходного на 0.11-0.31% от массы почвы, а за два года – на 0.20-0.57%, что эквивалентно 0.88-1.60% на 1 тонну азота, внесенного с навозом. Двухлетнее применение минеральных удобрений не изменило содержания  $C_{\text{орг}}$  в почве.



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%. 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.

Таким образом, при органической системе удобрения по сравнению с минеральной системой создается более сбалансированное состояние агрохимических свойств почвы, но использование минеральной системы удобрения обеспечивает более высокий урожай возделываемых культур.

### 3.2. УРОВНИ СОДЕРЖАНИЯ АКТИВНОГО ОРГАНИЧЕСКОГО ВЕЩЕСТВА В СЕРОЙ ЛЕСНОЙ ПОЧВЕ

Биологические свойства почвы и их краткосрочная динамика сопряжены с биологически активным пулом ПОВ. Активное ОВ выступает индикатором биологического качества ПОВ – его способности быть источником питания и энергии почвенным микроорганизмам, и чувствительно к агрогенным воздействиям [Семенов, Тулина, 2011]. Считается, что поддержание определенного уровня содержания активного ОВ в почве является обязательным условием сохранения и воспроизводства запасов ПОВ [Когут, 2003; Романенков и др., 2009; Шевцова, 2009; Шарков, 2011; Шарков, Данилова, 2010].

Содержание активного ОВ в серой лесной почве залежей составляло 99-138 мг С/100 г (6.0-8.2% от  $C_{орг}$ ), а в пахотной почве с разными системами удобрения – 47-92 мг/100 г (3.8-5.3% от  $C_{орг}$ ), что было в 1.2-2.1 раза меньше, чем в почве под залежью (табл. 1).

**Таблица 1.** Содержание активного ( $C_0$ ) ОВ и константа скорости его минерализации ( $k$ ) в почве под залежью и пашней с разными системами удобрения

№	Вариант	Содержание $C_0$		$k$ , сут <sup>-1</sup>
		мг/100 г	% от $C_{орг}$	
1	Залежь (контроль варианту 2)	115±41	6.6±0.4	0.034±0.006
2	Органическая система (два поля)	92±13	4.7±1.6	0.037±0.009
3	Залежь (контроль варианту 4)	133±24	6.3±1.4	0.035±0.008
4	Минеральная система (три поля)	68±2	4.2±0.2	0.038±0.005
5	Залежь (контроль вариантам 6 и 7)	99±19	6.0±0.5	0.036±0.001
6	Минеральная система по Миттлайдеру, гряды (четыре поля)	47±5	3.8±0.6	0.030±0.008
7	То же (межгрядья)	65±7	4.6±0.3	0.034±0.012
8	Залежь (контроль варианту 9)	138±11	8.2±1.3	0.024±0.004
9	Органо-минеральная система (три поля)	73±7	5.3±0.8	0.030±0.006

Примечание. В среднем для весеннего и осеннего сроков отбора проб

Среди пахотных почв наибольшее содержание активного ОВ обнаруживалось при органической системе удобрения, а самое низкое – при выращивании овощных культур и картофеля по методу Миттлайдера с интенсивным применением минеральных удобрений. Промежуточное положение по обеспеченности активным ОВ занимали недавно вовлеченная в производство после длительной залежи почва с минеральной системой и старопашотная почва с органо-минеральной системой удобрения. Судя по результатам, агрогенное обеднение пахотной серой лесной почвы ОВ осуществляется преимущественно за счет активного его пула: содержание валового  $C_{\text{орг}}$  и активного  $C_0$  в пахотной почве было соответственно в 1.2 и 1.8 раза меньше, чем под залежами.

В настоящее время неизвестно, как влияют возрастающие дозы минеральных и органических удобрений на обеспеченность почвы активным ОВ, что затрудняет разработку способов по его воспроизводству в пахотных почвах. В первый год опыта внесение возрастающих доз минеральных и органических удобрений увеличивало содержание в почве активного ОВ в 1.1-1.2 и 1.3-2.4 раза (табл. 2).

**Таблица 2.** Содержание в почве активного органического вещества при применении возрастающих доз минеральных и органических удобрений

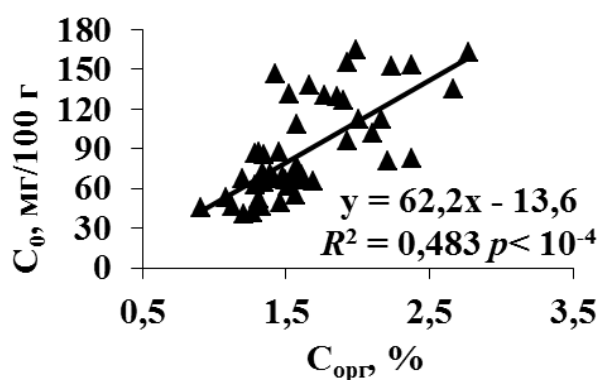
№	Вариант	1-й год опыта		2-й год опыта	
		мг/100 г	% от $C_{\text{орг}}$	мг/100 г	% от $C_{\text{орг}}$
1	Чистый пар	56 ± 1	6.1	43 ± 1	4.6
2	Без удобрений (контроль)	56 ± 1	5.8	48 ± 0	4.9
3	N1P1K1	59 ± 1	6.1	56 ± 0	5.7
4	N2P2K2	61 ± 2	6.4	53 ± 0	5.2
5	N3P3K3	62 ± 2	6.5	54 ± 1	5.4
6	N4P4K4	65 ± 1	6.6	53 ± 1	5.3
7	Навоз 25 т/га	75 ± 1	7.0	80 ± 1	6.7
8	То же 50 т/га	92 ± 4	8.2	114 ± 4	9.0
9	То же 75 т/га	106 ± 2	8.7	133 ± 1	9.2
10	То же 100 т/га	132 ± 3	10.4	171 ± 3	11.1

После второго года в почве чистого пара, контроля без удобрений и с внесением повышенных доз минеральных удобрений содержание активного ОВ уменьшилось в 1.1-1.3 раза по сравнению с первым годом, тогда как в вариантах с органическими удобрениями происходило обогащение почвы активным ОВ, доля которого достигала 7-11% от валового  $C_{\text{орг}}$ . Двухлетнее внесение навоза в мелиоративных дозах не приводило к насыщению серой лесной почвы активным ОВ.

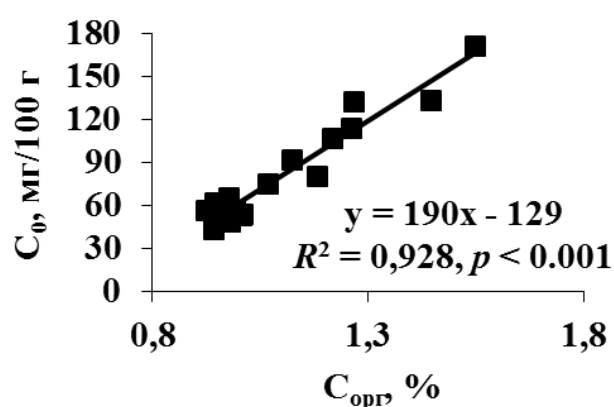
Содержание активного ОВ в почве достоверно коррелировало с общим  $C_{\text{орг}}$  как при применении разных систем удобрения, так и при внесении возрастающих доз минеральных и органических удобрений (рис. 1). Согласно

полученным уравнениям регрессии, повышение содержания в серой лесной почве валового  $C_{орг}$  на 500 мг/100 г может сопровождаться ростом содержания активного ОВ на 31-95 мг/100 г. 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. Удельные величины прироста активного ОВ в почве на 1 т азота минеральных удобрений после первого и второго года опыта составили 26 и 15 мг/100 г соответственно, тогда как на 1 т азота внесенного с органическими удобрениями были в 8 и 23 раза больше.

Залежи и посевы с разными системами удобрения



Возрастающие дозы минеральных и органических удобрений



**Рис. 1.** Изменение обеспеченности серой лесной почвы активным ( $C_0$ ) органическим веществом в зависимости от валового ( $C_{орг}$ ) его содержания.

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, использование органической системы удобрения позволяет поддерживать обеспеченность серой лесной почвы активным ОВ на уровне близком залежным землям. Самое низкое содержание активного ОВ свойственно почве 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 ОВ в серой лесной почве. Внесение мелиоративных доз органических удобрений позволяет оперативно повысить долю активного пула в составе почвенного органического вещества.

### 3.3. СТРУКТУРА АКТИВНОГО ПУЛА ОРГАНИЧЕСКОГО ВЕЩЕСТВА СЕРОЙ ЛЕСНОЙ ПОЧВЫ

Активный пул включает в себя доступные микроорганизмам компоненты почвенного органического вещества (ПОВ) со временем существования от менее 3-х до 10 лет. Активный пул ПОВ подразделяется обычно на две группы веществ с быстрой ( $k_1 = 0.1-0.2 \text{ сут}^{-1}$ ) и средней ( $k_2 = 10^{-3}-10^{-4} \text{ сут}^{-1}$ ) скоростью минерализации [Трофимов и др., 2012] или на легко ( $C_1, k_1 > 0.1 \text{ сут}^{-1}$ ), умеренно ( $C_2, 0.1 < k_2 > 0.01 \text{ сут}^{-1}$ ) и трудно ( $C_3, 0.01 < k_3 > 0.001 \text{ сут}^{-1}$ ) минерализуемые фракции [Семенов и др., 2006; Семенов, Тулина, 2011]. Такое разделение активного пула соответствует характеру освоения микроорганизмами свободного и защищенного ПОВ, органических соединений разной химической сложности и исходной прочности [Орлов, Бирюкова, 1998; Семенов и др., 2004; Семенов и др., 2009]. Траектории кривых кумулятивного продуцирования  $C-CO_2$  почвой за время соизмеримое продолжительности вегетационного периода дают представление о структуре активного пула ПОВ – соотношению легко, умеренно и трудно минерализуемых компонентов, отличающихся по скорости минерализации на порядок. 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. 3).

**Таблица 3.** Структура активного пула ПОВ серой лесной почвы под залежью и пашней с разными системами удобрения

№	Фракции					
	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	31±6	0.307±0.074	37±20	0.050±0.023	148±44	0.004±0.001
2	28±12	0.314±0.064	21±9	0.052±0.016	134±32	0.004±0.003
3	30±2	0.339±0.036	42±14	0.056±0.011	196±108	0.004±0.001
4	33±4	0.187±0.039	Нет	Нет	84±12	0.006±0.001
5	27±13	0.393±0.050	24±15	0.064±0.017	139±21	0.004±0.003
6	17±5	0.206±0.034	Нет	Нет	60±9	0.006±0.001
7	25±8	0.183±0.025	Нет	Нет	76±11	0.006±0.001
8	22±4	0.392±0.129	42±3	0.043±0.017	180±111	0.005±0.002
9	26±5	0.232±0.042	Нет	Нет	82±5	0.007±0.000

Примечание: Номера вариантов те же, что и в табл. 1. В среднем для весеннего и осеннего сроков отбора проб.

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. При этом, обеднение активного пула ПОВ трудно минерализуемой фракцией при

органической системе удобрения по сравнению с залежью было менее существенным, чем при минеральной и органо-минеральной системах.

Упрощение структуры активного пула ОВ в пахотной почве с утратой умеренно минерализуемой фракции может быть обусловлено недостаточным и нерегулярным поступлением со свежим органическим материалом макроорганического вещества, ограниченным приростом микробной биомассы, дестабилизацией ПОВ в результате дезагрегации, стимулированием его разложения минеральными удобрениями и механическими обработками [Семенов и др., 2004; Семенов и др., 2010; Gregorich et al, 2006].

В условиях микрополевого опыта в почве чистого пара, неудобренного контроля и с минеральной системой удобрения в первый и во второй год определялись легко и трудно минерализуемые фракции (табл. 4). Внесение органических удобрений приводило 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

**Таблица 4.** Структура активного пула ОВ серой лесной почвы при применении возрастающих доз минеральных и органических удобрений

№	Фракции					
	Легко минерализуемая (C <sub>1</sub> )		Умеренно минерализуемая (C <sub>2</sub> )		Трудно минерализуемая (C <sub>3</sub> )	
	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>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			<u>55±1</u>	<u>0.006±0.000</u>
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			<u>55±1</u>	<u>0.007±0.000</u>
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			<u>65±2</u>	<u>0.007±0.001</u>
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			<u>64±0</u>	<u>0.006±0.000</u>
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			<u>66±3</u>	<u>0.006±0.000</u>
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			<u>71±2</u>	<u>0.005±0.000</u>
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

Номера вариантов те же, что и в табл. 2. Над чертой – 1-й год опыта, под чертой – 2-й год опыта

Из полученных данных следует, что агрогенному изменению активного пула ПОВ, вызываемому интенсивным применением минеральных удобрений, сопутствуют, во-первых, утрата умеренно минерализуемой фракции, компоненты которой минерализуются и перераспределяются между легко и трудно минерализуемыми фракциями, во-вторых, мобилизация некоторого количества трудно минерализуемой фракции, которое в дальнейшем подвергается минерализации, теряясь из почвы. Чем сильнее увеличивалось под действием доз минеральных удобрений содержание трудно минерализуемой фракции в первый год опыта, тем существеннее была ее убыль после второго года опыта. Следовательно, минеральные удобрения мобилизуют лишь некоторое количество ПОВ, и в случае его израсходования мобилизующий эффект удобрений не проявляется.

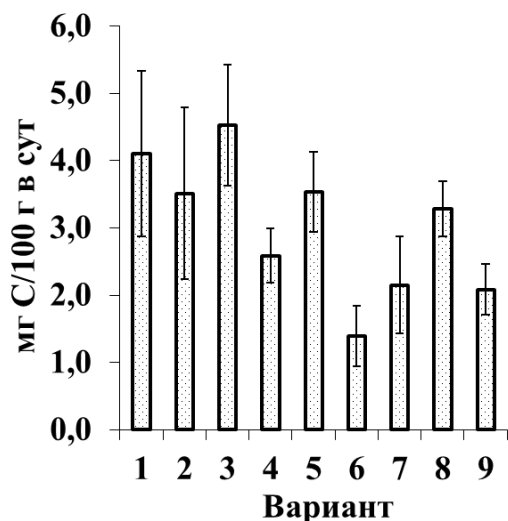
Таким образом, использование традиционных разновидностей минеральной и органо-минеральной систем удобрения приводит к изменению соотношений между легко, умеренно и трудно минерализуемыми фракциями, отличающимися по константе скорости минерализации на порядок, с упрощением структуры активного пула из-за утраты умеренно минерализуемой фракции. Применение экстремально высоких доз минеральных удобрений недопустимо без одновременного обогащения почвы разлагаемым органическим материалом. Внесение органических удобрений устраняет свойственные пахотным почвам нарушения качественного состава ПОВ, делая его более разнообразным и полноценным.

#### **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 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]. Интегральное представление о функциональности активного пула ПОВ можно получить с помощью индекса углеродминерализующей активности (УА), который устанавливается исходя из значений размера пула и скорости минерализации ПОВ.

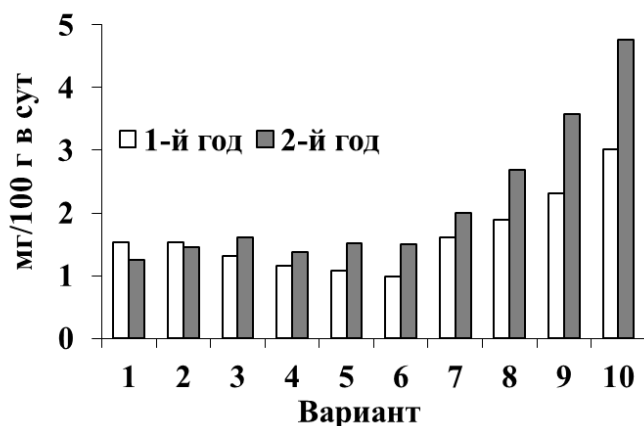
Самые высокие значения индексов УА были свойственны почве залежных участков, а среди пахотной почвы – при органической системе удобрения (рис. 2). При органо-минеральной, минеральной и интенсивной минеральной системе применения удобрений в гряды по Миттлайдеру индексы УА были в 1.6, 1.8 и 2.5 раза меньше, чем под залежами. В неудобренных междурядьях снижение УА было не столь сильным, чем в грядах. Следовательно, использование минеральной системы удобрения ведет к уменьшению минерализационной активности почвы.

Исследования в микрополевом опыте были направлены на уточнение закономерностей влияния минеральных и органических удобрений на 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 ослабление минерализационной активности (рис. 3).



**Рис. 2.** Углеродминерализующая активность серой лесной почвы под залежью и посевами с разными системами удобрения. Номера вариантов те же, что и в табл. 1. Средние величины весеннего и осеннего отбора проб.

Во второй год опыта не было установлено какой-либо зависимости индекса УА от доз минеральных удобрений. Эти данные согласуются с высказанным выше положением (см. глава 3.2), что минеральные удобрения, способствуя химической солюбилизации ПОВ, не стимулировали биологические процессы минерализации в почве. 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.



**Рис. 3.** Углеродминерализующая активность серой лесной почвы при внесении возрастающих доз минеральных и органических удобрений. Номера вариантов те же, что и в табл. 2.

Таким образом, применение экстремально высоких доз минеральных удобрений несет угрозу подавления углеродминерализующей активности почвы и недопустимо без внесения компенсирующих количеств разлагаемого органического материала. Реальное увеличение минерализационного потенциала достигается при органической системе удобрения.

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

Разнообразие индивидуальных органических соединений и механизмов их стабилизации в почве обуславливает разнокачественность ПОВ и многообразие методов оценки его состава, свойств и функций [Семенов и др., 2009; Olk, Gregorich, 2006; von Lützow et al, 2006; von Lützow et al, 2007; von Lützow et al, 2008]. Разработка чувствительных и адекватных методов характеристики пула активного ОВ в разных зональных условиях почв является одной из актуальных задач в современных исследованиях [Шевцова, 2009]. Содержание в почве «активного гумуса» предлагается устанавливать с помощью водной вытяжки, экстракций горячей водой, 0,1 н. NaOH (подвижное ОВ), нейтральным раствором пирофосфата натрия (лабильное ОВ) или денсиметрическим (легкоразлагаемое ОВ) способом [Ганжара и др., 1990; Ганжара и др., 2005; Когут, 2003; Шевцова, 2009; Шевцова и др., 2012]. По другому мнению, активное ПОВ следует диагностировать по степени его доступности почвенным микроорганизмам, определяя потенциально-минерализуемый пул по количеству C-CO<sub>2</sub> за время инкубации соизмеримое продолжительности вегетационного периода [Семенов, Тулина, 2011].

В залежной серой лесной почве на долю подвижного ОВ, экстрагируемого 0.1 н. NaOH (C<sub>подв</sub>), приходилось 18-24% от валового C<sub>орг</sub>, а в почве под посевами – 12-17% (табл. 5). В почве с органической системой удобрения содержалось примерно такое же количество C<sub>подв</sub>, что и под залежью, тогда как при органо-минеральном удобрении – в 1.7 раз меньше, а при минеральной системе – меньше в 2 раза.

**Таблица 5.** Содержание подвижного (C<sub>подв</sub>) и растворенного (C<sub>рп</sub>) органического вещества в почве под залежью и посевами с разными системами удобрения

№	C <sub>подв</sub>		C <sub>рп</sub>	
	мг/100 г	% от C <sub>орг</sub>	мг/100 г	% от C <sub>орг</sub>
1	328 ± 27	18 ± 6	31.3 ± 3.2	1.7 ± 0.6
2	309 ± 78	15 ± 2	29.6 ± 3.8	1.5 ± 0.4
3	400 ± 97	19 ± 3	30.2 ± 4.2	1.4 ± 0.3
4	196 ± 56	12 ± 4	26.1 ± 7.3	1.6 ± 0.5
5	394 ± 9	24 ± 6	30.9 ± 2.9	1.9 ± 0.7
6	200 ± 33	16 ± 4	25.3 ± 6.9	2.0 ± 0.6
7	Не опр.	Не опр.	24.3 ± 8.1	1.8 ± 0.7
8	403 ± 52	23 ± 3	30.3 ± 2.3	1.8 ± 0.3
9	233 ± 26	17 ± 1	25.9 ± 3.4	1.9 ± 0.3

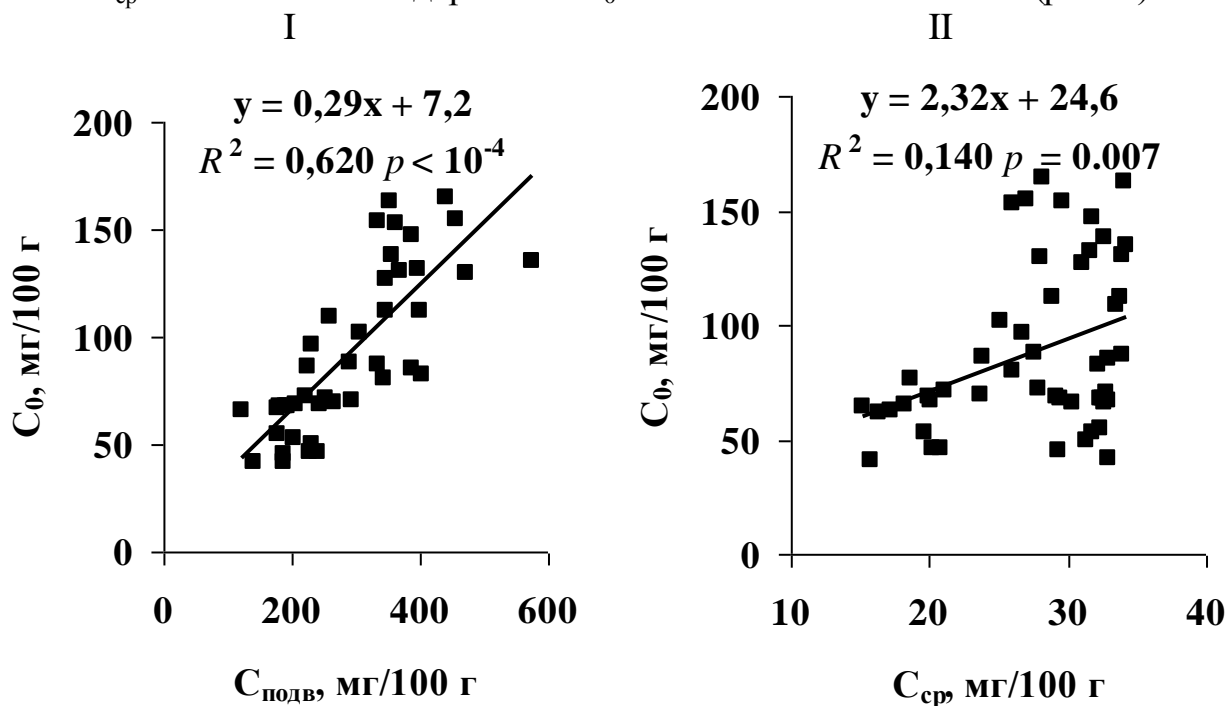
Примечание: Номера вариантов те же, что и в табл. 1. Средние величины весеннего и осеннего отбора проб

Содержание растворенного (C<sub>рп</sub>) в исследуемой серой лесной почве было в 8-13 раз меньше, чем C<sub>подв</sub>, составляя всего лишь 1.4-2.0% от валового C<sub>орг</sub> (табл. 5). Из сопоставления содержания подвижной и растворенной фракций (табл. 5) с размером активного пула (табл. 1) следует, что только 22-40%



подвижного ПОВ могло бы минерализоваться за вегетационный период, а в растворимом состоянии обнаруживалось 19-57% от активного ПОВ.

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 прирост в серой лесной почве  $C_{\text{подв}}$  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. 4).



**Рис. 4.** Изменение содержания активного ( $C_0$ ) органического вещества в серой лесной почве в зависимости от ее обеспеченности подвижной (I) и растворенной (II) фракциями

В растворенном состоянии содержалось в среднем почти столько же углерода сколько его обнаруживалось в  $C_1$  фракции ( $25 \pm 7$  и  $28 \pm 6$  мг/100 г, соответственно), с достоверной корреляцией ( $r = 0.475$ ,  $p < 10^{-3}$ ) между ними (табл. 3 и 5). 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. Таким образом, при экстракции 0.1 н. NaOH наряду с трудно минерализуемыми компонентами извлекается значительная часть полностью защищенных и потому неактивных соединений.

Растворенное, подвижное и активное ОВ серой лесной почвы демонстрировали разную чувствительность к внесению органических и минеральных удобрений в возрастающих дозах (табл. 6). При внесении органических удобрений в почве содержалось больше  $C_{\text{подв}}$ , чем при минеральной системе (табл. 6), а увеличение его содержания в первый и второй год опыта в большей мере зависело от возрастающих доз навоза, чем от

доз НРК. В целом по опыту обнаруживалась достоверная зависимость между содержанием в почве валового и подвижного углерода ( $r = 0.805$ ,  $p < 10^{-3}$ ), однако при внесении минеральных удобрений корреляционная связь между  $C_{орг}$  и  $C_{подв}$  была недостоверной, в отличие от вариантов с возрастающими дозами органических удобрений ( $r = 0.826$ ,  $p = 0.003$ ).

Рост содержания в почве  $C_{подв}$  без соответствующего прироста валового  $C_{орг}$  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. 4). Наоборот, увеличение содержания  $C_{подв}$  в 1.2-1.4 раза по мере повышения доз органических удобрений было меньше прироста  $C_{орг}$ , из-за чего доля  $C_{подв}$  в  $C_{орг}$  снижалась.

**Таблица 6.** Содержание в почве подвижного ( $C_{подв}$ ) и растворенного ( $C_{ср}$ ) органического вещества при применении возрастающих доз минеральных и органических удобрений

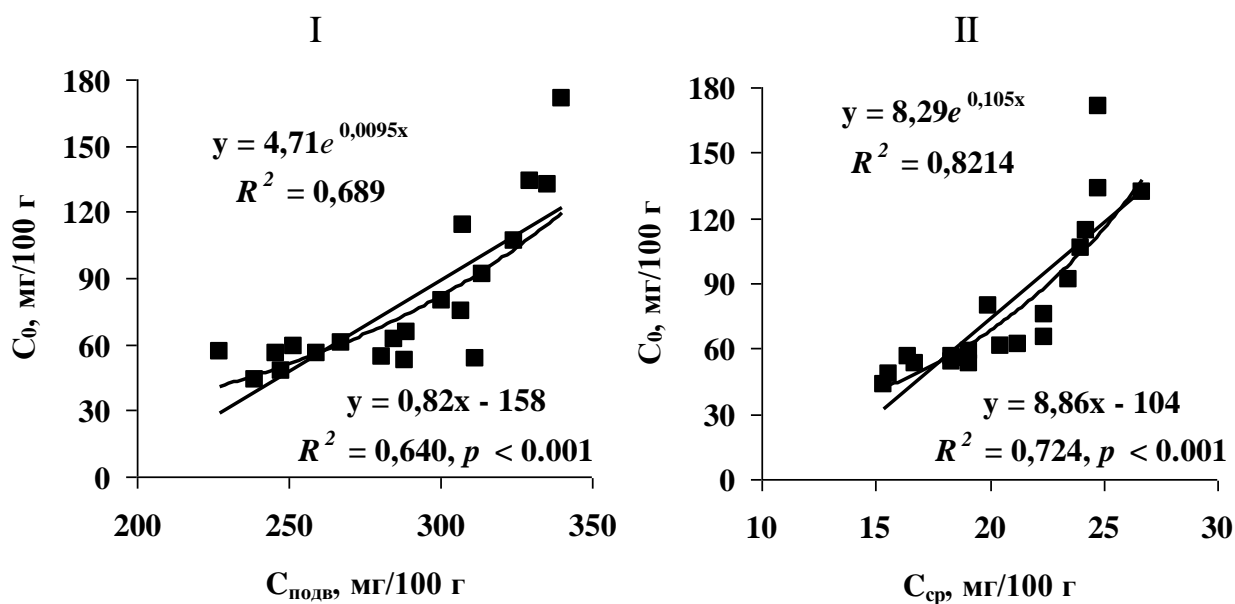
№	1-й год опыта				2-й год опыта			
	$C_{подв}$		$C_{ср}$		$C_{подв}$		$C_{ср}$	
	мг/100 г	% от $C_{орг}$	мг/100 г	% от $C_{орг}$	мг/100 г	% от $C_{орг}$	мг/100 г	% от $C_{орг}$
1	227 ± 3	25	18 ± 2	2.0	239 ± 20	25	15 ± 2	1.6
2	246 ± 2	26	19 ± 1	1.9	248 ± 16	25	16 ± 1	1.6
3	252 ± 22	26	19 ± 1	2.0	259 ± 16	26	16 ± 2	1.7
4	267 ± 4	28	20 ± 1	2.2	288 ± 0	29	17 ± 3	1.7
5	285 ± 36	30	21 ± 2	2.3	281 ± 2	28	18 ± 3	1.8
6	289 ± 38	30	22 ± 1	2.3	311 ± 16	31	19 ± 2	1.9
7	307 ± 51	29	22 ± 2	2.1	301 ± 36	25	20 ± 2	1.7
8	314 ± 20	28	23 ± 4	2.1	308 ± 26	24	24 ± 3	1.9
9	325 ± 15	27	24 ± 3	2.0	329 ± 5	23	25 ± 3	1.7
10	335 ± 10	26	27 ± 1	2.1	340 ± 10	22	25 ± 1	1.6

Примечание: Номера вариантов те же, что и в табл. 2

В серой лесной почве при внесении возрастающих доз минеральных и органических удобрений содержание  $C_{ср}$  было в 13-16 раз меньше, чем  $C_{подв}$ , составляя всего лишь 1.6-2.3% от валового  $C_{орг}$  (табл. 4), достоверно коррелируя как с подвижным ( $r = 0.744$ ,  $p < 10^{-3}$ ), так и с валовым ОВ ( $r = 0.805$ ,  $p < 10^{-3}$ ). По отношению к неудобренному контролю наибольшее содержание  $C_{ср}$  было в вариантах с применением навоза в возрастающих дозах. Судя по результатам, за вегетационный период было способно минерализоваться только 17-50% подвижного ОВ, завися от доз минеральных и органических удобрений и кратности их внесения (табл. 2 и 6). Чем больше в почве содержится  $C_{подв}$ , тем выше обеспеченность активным ОВ (рис. 5).

На фракцию растворенного ОВ приходилось от 14 до 36% активного ОВ, при этом при минеральной системе доля  $C_{раст}$  в  $C_0$  была выше, чем при органическом удобрении (табл. 2 и 6). Содержание  $C_{раст}$  в почве также дает

представление о степени ее обеспеченности активным ОВ, как это следует из достоверной зависимости между этими показателями (рис. 5). Согласно уравнениям, приведенным на рис. 5, 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.



**Рис. 5.** 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.

Таким образом, не все подвижное ПОВ, извлекаемое раствором щелочи, является биологически активным. В то же время, подвижную фракцию допустимо считать ближайшим резервом активного (потенциально-минерализуемого) ОВ. В растворенном состоянии находится лишь часть активного органического вещества, содержащегося в почве.

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

Поддержание качества почвы – ключевое условие устойчивого функционирования агроэкосистем и земледелия в целом. Качество почвы оценивается комплексом разночувствительных параметров, среди которых содержание органического и микробного углерода относятся к ключевым показателям [Carter, 2002; Karlen et al, 2003].

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. 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). Сильной изменчивостью характеризовались  $N_{\text{мин}}$  и  $C_{\text{раств}}$  (табл. 7).

**Таблица 7.** Существенность различий агрохимических свойств серой лесной почвы между весенним и осенним отборами проб по  $t_{05}$ -тесту

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

Примечание: Номера вариантов те же, что и в табл. 1. Разница средних существенна (+), не существенна (–), нет данных (0).

Группу умеренно изменчивых параметров составляли  $N_{\text{г}}$ , подвижные  $P_2O_5$  и  $K_2O$ , а также углерод легко, умеренно и трудно минерализуемых фракций активного пула ПОВ. Слабую изменчивость демонстрировали  $pH_{\text{KCl}}$  и  $N_{\text{общ}}$ , тогда как подвижный ( $C_{\text{подв}}$ ), активный ( $C_0$ ) и общий органический углерод ( $C_{\text{орг}}$ ) можно считать относительно стабильными на протяжении вегетационного сезона. 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. В целях оперативной диагностики обеспеченности серой лесной почвы активным ОВ можно ограничиться 20-суточной инкубацией, пересчитав кумулятивное количество  $C-CO_2$  (мг/100 г) в  $C_0$  (мг/100 г) с помощью уравнения 4, полученного опытным путем.

$$C_0 = 1.86 \cdot C-CO_2 + 3.27, \quad r = 0.931, \quad p < 10^{-4} \quad (4).$$

Вычисленные по этому уравнению величины  $C_0$ , тесно коррелировали с фактическими его значениями, полученными при 23-недельной инкубации ( $r = 0.921, p < 10^{-4}$ ), а разность средних была не существенна по  $t_{0.5}$ -критерию.

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, был при органической системе удобрения, а наименьший – с интенсивным применением минеральных удобрений под культуры, возделываемые по методу Миттлайдера. Почва с органо-минеральной системой удобрения занимала промежуточное положение по обеспеченности активным органическим веществом.
3. Увеличение содержания  $C_{орг}$  в серой лесной почве на 500 мг/100 г 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 существования в 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. 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 работ, опубликованных по теме диссертации**

1. Зинякова Н.Б., Семенов В.М. Функциональное состояние органического вещества серой лесной почвы при разных системах удобрения сельскохозяйственных культур // **Проблемы агрохимии и экологии**. 2013. №1. С.3-8.
2. Зинякова Н.Б., Ходжаева А.К., Тулина А.С., Семенов В.М. Активное органическое вещество серой лесной почвы пахотных и залежных земель // **Агрохимия**. 2013. № 9. С.3-14.
3. Зинякова Н.Б., Семенов В.М. Влияние возрастающих доз органических и минеральных удобрений на пулы растворенного, подвижного и активного органического вещества в серой лесной почве // **Агрохимия**. 2014. № 6. С. 8-19.
4. Зинякова Н.Б., Семенов В.М. Микробная биомасса как ключевой компонент органического вещества почвы и чувствительный индикатор его качества // Почвенно-земельные ресурсы: оценка, устойчивое использование, геоинформационное обеспечение. Минск: Изд. центр БГУ, 2012. С. 116-118.
5. Зинякова Н.Б., Семенов В.М. Диагностика обеспеченности серой лесной почвы агроценозов и залежей активным органическим веществом // Теоретические и технологические основы воспроизводства плодородия почв и продуктивность сельскохозяйственных культур. Москва: РГАУ-МСХА, 2012. С. 478-481.
6. Зинякова Н.Б., Семенов В.М. Влияние разных систем удобрения на качество органического вещества серой лесной почвы // Биологизация адаптивно-ландшафтной системы земледелия - основа повышения плодородия почвы, роста продуктивности сельскохозяйственных культур и сохранения окружающей среды. Белгород: «Отчий край», 2012. т.2. С.91-96.
7. Зинякова Н.Б., Семенов В.М. Влияние разных систем удобрения на содержание и качество органического вещества в серой лесной почве // Системы использования органических удобрений и возобновляемых ресурсов в ландшафтном земледелии. Владимир: ГНУ ВНИИОУ, 2013. т.1. С.93-102.
8. Зинякова Н.Б., Семенова Н.А. Углеродминерализующая активность серой лесной почвы при органической и минеральной системах удобрения // Наследие И.В. Тюрина в современных исследованиях в почвоведении. Казань: «Отечество». 2013. С. 65-67.
9. Зинякова Н.Б., Семенов В.М. Изменение качественных показателей органического вещества серой лесной почвы при разных системах удобрения // Органическое вещество почв. Санкт-Петербург: СПбГАУ. 2013. С. 38-40.