УДК 631.46:631.5:577.4 DOI: 10.25680/S19948603.2025.147.21

ДИНАМИКА БИОЛОГИЧЕСКИХ ФУНКЦИЙ ПОЧВЫ В СЕВООБОРОТЕ ПОД ВЛИЯНИЕМ ТЕХНОЛОГИЙ РАЗЛИЧНОЙ ИНТЕНСИВНОСТИ: КОМПЛЕКСНАЯ ОЦЕНКА МЕТОДАМИ БИОТЕСТИРОВАНИЯ

С.С. Ладан, к.б.н., ФГБНУ «Всероссийский научно-исследовательский институт агрохимии имени Д.Н. Прянишникова», 127434, Россия, г. Москва, ул. Прянишникова, 31
E-mail: info@vniia-pr.ru

Исследование выполнено по Государственному заданию № 0429-2024-0001 (публикуется в авторской редакции).

Проведён количественный анализ способности почвы агроценоза выполнять фундаментальные экосистемные функции под влиянием технологического пресса различной интенсивности. Методом многомодельного биотестирования дана сравнительная оценка воздействия экстенсивной (ЭТ), обычной (ОТ) и высокоинтенсивной (ВТ) технологий возделывания озимой пшеницы на биоту агродерново-подзолистой среднесуглинистой почвы в динамике сезона (начало и конец вегетации) с учётом последействия предшественников (озимые зерновые, подсолнечник по обычной и технологии Clearfield, вико-овёс). Установлено, что ВТ вызывает выраженный функциональный дисбаланс: стимуляция краткосрочной минерализации (потеря массы остатков пшеницы в варианте ОТ – 70.5%) достигается за счет угнетения средообразующей функции для мезофауны (ингибирование репродукции энхитреид Enchytraeus albidus на 55%) и долгосрочного гумусообразования (замедление разложения остатков предшественника в варианте ВТ до 41.3%). Выявлен синергетический негативный эффект при сочетании ВТ с последействием подсолнечника по системе Clearfield, приведший к максимальному подавлению всех функций. Напротив, ЭТ на фоне сидерата поддерживала сбалансированный функциональный профиль. На основе батареи тестов (фитотестирование с ячменем, гречихой, свеклой, сорго, редькой масличной; зоотест с энхитреидами; оценка деструкции) разработан интегральный индекс биологического отклика (ИБО), позволивший ранжировать технологии по степени экологического риска. Результаты свидетельствуют о функциональном компромиссе в агроэкосистемах и необходимости исключения последовательного применения интенсивных химических технологий в севообороте для сохранения биологической регуляции почвенного плодородия.

Ключевые слова: функциональный компромисс, экосистемные функции почвы, биологическое регулирование плодородия, многомодельное биотестирование, технологии возделывания озимой пшеницы, экстенсивная, обычная, высокоинтенсивная, энхитреиды, разложение растительных остатков, интегральный индекс биологического отклика (ИБО), предшественник, технология Clearfield, агродерново-подзолистая почва.

Для цитирования: *Ладан С.С.* Динамика биологических функций почвы в севообороте под влиянием технологий различной интенсивности: комплексная оценка методами биотестирования// Плодородие. – 2025. - №6. – С. 104-109. DOI: 10.25680/S19948603.2025.147.21.

Устойчивость земледелия в условиях усиления антропогенной нагрузки на агроэкосистемы напрямую зависит от способности почвы сохранять не только запас питательных элементов, но и функциональную целостность почвенной биоты. Биота почвы включает широкий спектр микроорганизмов, микрофауну и мезофауну, обеспечивающих ключевые экосистемные функции: деструкцию органического вещества, минерализацию и иммобилизацию элементов питания, поддержание агрегатного состояния и супрессию фитопатогенов. Интенсификация растениеводства, связанная с увеличением пестицидной и минеральной нагрузки и изменением систем обработки почвы, ставит под вопрос способность почвы как саморегулирующейся системы поддерживать эти функции в долгосрочной перспективе.

В традиционной практике оценка влияния агротехнологий на почву базируется преимущественно на агрохимических и отдельных микробиологических показателях (содержание гумуса, подвижных форм элементов питания, численность отдельных трофических или таксономических групп микроорганизмов). Такие показатели фиксируют состояние системы, но слабо отражают её функциональную устойчивость и способность к восстановлению после нагрузки. В последние годы всё большее внимание уделяется функциональным индикаторам почвенного здоровья, включая скорость разложения органических остатков, ферментативную активность, биоиспытания с растениями и почвенными беспозвоночными. Вместе с тем в большинстве исследований используются единичные тест-объекты или отдельные процессы, тогда как переход к интенсивным технологиям сопровождается сложным комплексом воздействий (пестициды, удобрения, механическая обработка), формирующих интегральный «технологический пресс» на почвенное сообщество.

Методы биотестирования почвы позволяют оценивать интегральный биологический отклик на совокупность факторов среды. Однако стандартные подходы часто ограничиваются одним-двумя тестами (например, фитотест на кресс-салате или зоотест на дафниях с водными вытяжками), что не отражает реального эдафического стресса в целостной почвенной матрице. В отношении почвенной фауны репродукционный тест с энхитреями (OECD 220) признан чувствительным и информативным методом для оценки хронической токсичности загрязнителей, но редко интегрируется с оценкой растительных и деструкционных ответов. Параллельно развивается подход к функциональной оценке почвенной биоты через скорость разложения стандартных субстратов (например, Tea Bag Index) и раздельный учёт лабильных и устойчивых фракций органического вещества.

В отечественной практике практически отсутствуют комплексные исследования, которые одновременно: (1) сочетали бы батарею фитотестов с культурами,

контрастными по чувствительности к гербицидам и типу метаболизма, с зоотестом на энхитреидах как ключевых представителях почвенной мезофауны и прямой оценкой скорости деструкции натуральных растительных остатков предшественника и основной культуры; (2) учитывали бы динамику биологического отклика почвы в течение вегетационного сезона (ключевые агрофенофазы) для выявления кумулятивного эффекта технологической нагрузки; (3) анализировали бы опосредующую роль предшественника, возделываемого по контрастным системам (включая гербицидно-интенсивные системы типа Clearfield), в формировании экотоксикологического фона для последующей культуры .

Научная новизна настоящего исследования заключается в разработке и апробации комплексного подхода к интегральной оценке функционального состояния агродерново-подзолистой почвы в звеньях севооборота при контрастных технологиях возделывания озимой пшеницы и её предшественников. Подход основан на многомодельном биотестировании, включающем: (1) фитотесты с набором культур-индикаторов (злаки и двудольные, различающиеся чувствительностью к гербицидам); (2) тест репродукции энхитреид (Enchytraeus albidus) как индикатора состояния почвенной мезофауны; (3) оценку скорости разложения растительных остатков предшественников и озимой пшеницы в полевых условиях. На основе нормированных показателей разработан интегральный индекс биологического отклика (ИБО), позволяющий ранжировать агротехнологические цепочки по степени экологической напряженности. Такой подход согласуется с современными концепциями комплексной оценки почвенного здоровья и функциональных trade-off между продуктивностью и экосистемными функциями.

Цель работы — комплексная сравнительная оценка воздействия экстенсивной, обычной и высокоинтенсивной технологий возделывания озимой пшеницы, а также технологий возделывания предшественников, на биологическое состояние агродерново-подзолистой почвы методами многомодельного биотестирования в динамике вегетационного периода. Задачи: (1) оценка фитотоксического потенциала почв по батарее тест-культур в начале и в конце вегетации пшеницы; (2) исследование выживаемости и репродукции энхитреид как индикатора состояния почвенной мезофауны; (3) определение скорости разложения растительных остатков предшественников и озимой пшеницы в полевых условиях; (4) анализ влияния предшественников, возделываемых по различным технологиям, на биологические показатели почвы под последующей пшеницей; (5) разработка и апробация интегрального индекса биологического отклика (ИБО) для ранжирования агротехнологий по степени их экологического риска.

Методика. Исследования выполнены в 2023–2024 гг. на стационаре опытной станции «Барыбино» (Домодедовский район, Московская область) на агродерново-подзолистой среднесуглинистой почве на покровном суглинке. Пахотный горизонт (0–20 см) характеризовался низким содержанием гумуса (1,8–2,1% по Тюрину), слабокислой реакцией (pH_{KCl} 5,5–5,8), умеренной гидролитической кислотностью (2,0–2,5 мг-экв/100 г) и средним уровнем насыщенности основаниями (12–14 мг-экв/100 г), при повышенном содержании подвижного фосфора и обменного калия.

Исследуемое звено севооборота включало последовательность культур: озимые зерновые – подсолнечник – вико-овёс – озимая пшеница; объектом детального изучения являлась почва под озимой пшеницей при трёх технологиях её возделывания.

Возделывание озимой пшеницы осуществлялось по трём контрастным технологиям, различающимся уровнем интенсификации:

Экстенсивная технология (ЭТ): отсутствие применения пестицидов и минеральных удобрений; основная обработка – поверхностное рыхление (дискование на 10–12 см); предпосевная обработка – культивация; стандартная норма высева.

Обычная технология (ОТ): отвальная вспашка на 20–22 см; внесение удобрений в дозе $N_{60}P_{60}K_{60}$; протравливание семян фунгицидом и применение гербицида страхового действия в фазу кущения; при уборке солома измельчалась и равномерно распределялась по полю.

Высокоинтенсивная технология (ВТ): повышенная насыщенность химическими средствами защиты растений и регуляторами роста при минимизированной обработке почвы (Mini-Till), сочетающей поверхностное рыхление с многократными химическими обработками в течение вегетации.

Критически важным фактором являлась технология возделывания предшественника подсолнечника, выращиваемого на одних и тех же участках по двум системам. При обычной технологии применялся стандартный набор почвенных и послевсходовых гербицидов. В системе Clearfield (CF) использовали гербициды на основе имидазолинонов (включая имазамокс) в сочетании с десикацией посевов препаратом на основе диквата в фазу физиологической спелости, что формирует специфический гербицидный и десикационный фон. Вико-овсяная смесь использовалась как сидеральный предшественник, обеспечивающий высокое поступление легкоразлагаемого органического вещества и азота.

На параметры биологического состояния почвы под озимой пшеницей воздействовали: (1) технология её возделывания (ЭТ, ОТ, ВТ); (2) технология возделывания предшественника-подсолнечника (обычная или CF, для участков с подсолнечником); (3) общий тип предшественника в севообороте (озимые зерновые, подсолнечник, вико-овёс). При этом следует отметить, что предшественник подсолнечник в производственной схеме не рассматривался как реальный предшественник озимой пшеницы: его растительные остатки дополнительно изучались в модельной серии для сопоставления их влияния на деструкцию и биотест-показатели с остальными предшественниками. Схема по оценке разложения остатков озимой пшеницы не являлась полностью факториальной и включала только комбинации, представленные в Таблице 4. Площадь учётной делянки – 25 м², повторность – 4-кратная.

Отбор почвенных образцов для биотестирования отбирали дважды в течение вегетации озимой пшеницы:

- 1-й отбор (начало сезона): фаза начала весеннего кущения (начало активной вегетации);
- 2-й отбор (конец сезона): фаза полной спелости, непосредственно перед уборкой (период пика накопления возможных метаболитов и завершения действия препаратов).

Отбор проводили методом «конверта» с 5 точек по пахотному слою (0–20 см) с формированием объединённой пробы с каждой делянки. Образцы очищали от видимых растительных остатков, доводили до влажности 60% от полной полевой влагоёмкости и выдерживали 7 суток

при +22°C для стабилизации микробиологической активности перед постановкой биотестов.

Для оценки деструкции растительных остатков использовали метод закладки стандартных сетчатых мешочков (litter-bags): в них помещали воздушно-сухие остатки (1) предшественников (подсолнечник, викоовёс, солома озимых зерновых) – закладка в поверхностный слой почвы (в зависимости от технологии обработки) осенью перед посевом пшеницы; (2) озимой пшеницы (солома) – закладка после уборки. Извлечение мешочков и взвешивание проводили через 9–10 месяцев экспозиции.

Фитотестирование проводили в соответствии с ГОСТ Р ИСО 18763-2019. В качестве тест-объектов использовали: Hordeum vulgare L. (ячмень), Fagopyrum esculentum Moench (гречиха), Beta vulgaris L. (свекла сахарная), Sorghum bicolor (L.) Moench (сорго), Raphanus sativus var. oleiformis Pers. (редька масличная). Данный набор репрезентирует культуры с контрастной чувствительностью к гербицидам разных групп (гормональные, сульфонилмочевины, ингибиторы ацетолактатсинтазы) и различными типами метаболизма (однодольные и двудольные). Проращивание проводили непосредственно в почве с опытных делянок (50 г почвы в чашке Петри) и на водных вытяжках (1:5). По 20 семян каждого вида на вариант. Условия инкубации: t = 25±1°C, фотопериод 16/8 ч, 120 часов. По окончании периода проращивания оценивали: (1) лабораторную всхожесть (%), (2) длину первичного корня и гипокотиля (мм), (3) сырую биомассу проростков (мг). Рассчитывали индекс всхожести (ИВ) и относительную фитотоксичность (%), сравнивая результаты с контролем (почва из-под целинного участка или многолетних трав).

При биотестирование с энхитреидами использовали вид Enchytraeus albidus (Westheide & Graefe), культивируемый в лаборатории на субстрате из торфа и цеолита. Тест проводили согласно Руководству OECD Test No. 220 "Enchytraeid Reproduction Test" (2016) с модификацией по увеличению числа реплик. В сосуды с 30 г увлажнённой тестируемой почвы помещали 10 взрослых синхронизированных по возрасту особей. Инкубация: 20±1°C, в темноте, 28 суток. По окончании экспозиции почву фиксировали этанолом и окрашивали бенгальским розовым. Проводили извлечение и подсчёт выживших взрослых особей и ювенильных особей. Рассчитывали коэффициент репродукции (КР = число ювенильных особей / число выживших взрослых) и уровень ингибирования репродукции (%) относительно контроля.

Оценка скорости деструкции растительных остатков. После извлечения сетчатых мешочков остатки очищали от минеральных частиц, высушивали до постоянной массы при 60°C и взвешивали на аналитических весах. Скорость деструкции (коэффициент разложения, k, год$^{-1}$) рассчитывали по упрощённой экспоненциальной модели: $k = -\ln(M_t / M_0) / t$, где M_0 – начальная масса, M_t – масса после времени экспозиции t (в годах). Процент потери массы (% разложения) вычисляли как $(M_0 - M_t) / M_0 \times 100$. Данный подход согласуется с методологией Tea Bag Index и широко используется в исследованиях динамики органического вещества в полевых условиях.

Расчёт интегрального индекса биологического отклика и статистический анализ. Для приведения разнородных показателей к сопоставимой шкале каждый из них нормировали относительно контроля (целинная почва под многолетними травами), принимая контрольное значение за 1,0. Нормированные значения рассчитывали по формуле $X_{norm} = X / Xcontrol$, где X – значение показателя в варианте опыта, Xcontrol – среднее значение в контрольном варианте. Для параметров, отражающих стресс (фитотоксичность), использовали преобразование $X_{norm} = 1 - I$, где I – относительное ингибирование по сравнению с контролем (доля единицы). Таким образом, большие значения X_{norm} во всех случаях соответствовали более благоприятному биологическому состоянию почвы. Для каждого варианта опыта интегральный индекс биологического отклика (ИБО) рассчитывали, как сумму трёх нормированных показателей: (1 – относительная фитотоксичность по редьке масличной), репродукция энхитреид (КР), скорость разложения остатков (k или % потери массы, нормированные аналогично). Контрольное значение ИБО = 3,0; диапазон в опыте: 0–3,0 баллов. Значения ИБО < 1,5 (менее 50% от уровня контроля) рассматривались как ориентировочный сигнальный уровень критической дисфункции, требующей дополнительного мониторинга .

Для проверки статистической значимости влияния факторов (технология, время отбора, предшественник) применяли многофакторный дисперсионный анализ (ANOVA) с последующим post-hoc тестом Тьюки для множественных сравнений средних (при $p < 0,05$). Корреляционные связи между параметрами оценивали с помощью коэффициента корреляции Пирсона (по модулю $r \geq 0,79$ рассматривались как сильные); уровень значимости $p \leq 0,01$. Для интеграции многомерных данных и визуализации группировки вариантов использовали метод главных компонент (PCA). Все расчёты выполнены в среде R (v.4.3.1) с использованием пакетов lme4, emmeans, FactoMineR, ggplot2.

Результаты и их обсуждения. Сравнительный анализ длины первичного корня у пяти тест-культур выявил статистически значимое ($p < 0,05$) влияние факторов «технология», «время отбора» и их взаимодействия. Наиболее выраженная негативная динамика от начала к концу сезона наблюдалась в варианте с высокоинтенсивной технологией (ВТ) для всех культур, особенно чувствительных двудольных (табл. 1).

1. Длина первичного корня проростков тест-культур (мм, M±m, n=4) в зависимости от технологии возделывания озимой пшеницы и времени отбора проб

Технология	Период	Ячмень	Гречиха	Свекла	Сорго	Редька масличная
Контроль	–	50,1 ± 2,3 a	42,5 ± 1,9 a	38,8 ± 1,7 a	55,3 ± 2,5 a	34,0 ± 1,6 a
ЭТ	Н	48,2 ± 2,1 a	39,8 ± 1,8 a	36,2 ± 1,6 a	53,1 ± 2,4 a	32,5 ± 1,5 a
	К	45,8 ± 1,9 a	38,1 ± 1,7 ab	34,9 ± 1,5 a	51,0 ± 2,3 a	30,1 ± 1,7 a
ОТ	Н	41,5 ± 1,8 b	34,1 ± 1,5 b	29,5 ± 1,3 b	49,7 ± 2,2 a	28,4 ± 1,3 b
	К	43,7 ± 2,0 ab	35,9 ± 1,6 b	31,8 ± 1,4 b	50,2 ± 2,3 a	29,5 ± 1,4 ab
ВТ	Н	38,7 ± 1,6 c	30,2 ± 1,3 c	25,1 ± 1,1 c	47,5 ± 2,1 a	25,8 ± 1,1 c
	К	29,3 ± 1,2 d	22,4 ± 1,0 d	18,7 ± 0,8 d	40,3 ± 1,8 b	18,9 ± 0,9 d

Примечание: В пределах одного столбца значения, обозначенные разными буквами, достоверно различаются по критерию Тьюки ($p < 0.05$); Н- начало вегетации, К- конец вегетации

Результаты фитотестирования свидетельствуют о чётком градиенте возрастания фитотоксического потенциала от ЭТ к ВТ. Угнетение роста корней на варианте ВТ к концу сезона было максимальным для всех культур: наиболее сильное подавление отмечено у редьки масличной (снижение на 27%) и свеклы (на 26%), что характерно для остаточного действия гербицидов гормонального и сульфонилмочевинного типов. Сорго проявило наибольшую устойчивость, согласуясь с известной толерантностью этой культуры к ряду гербицидов. На варианте ОТ наблюдалась тенденция к частичному восстановлению показателей от начала к концу сезона (увеличение длины корня ячменя с 41,5 до 43,7 мм), что указывает на постепенное снижение фитотоксичности при обычной обработке, тогда как на варианте ВТ все показатели продолжали значимо ухудшаться, указывая на кумулятивный характер стресса при высокоинтенсивной технологии.

Опосредующее влияние предшественника на биологическое состояние почвы под озимой пшеницей было наиболее контрастно выражено в начале вегетации озимой пшеницы и сохранялось в виде последействия на биологическую активность почвы. Данные убедительно демонстрируют, что предшественник и технология его возделывания формируют критически важный исходный фон для последующей культуры.

2. Интегральный индекс биологического отклика (ИБО) почвы перед посевом озимой пшеницы в зависимости от предшественника и технологии его возделывания

Предшественник/ Технология	Фитотоксичность (корни)	Репродукция энхитреид	Деструкция остатков	ИБО (сумма баллов)
	Нормализованный балл			
Озимые зерновые/ОТ	0,75 ± 0,05	0,80 ± 0,06	0,85 ± 0,07	2,40 ± 0,12 b
Подсолнечник/ОТ	0,65 ± 0,04	0,70 ± 0,05	0,60 ± 0,05	1,95 ± 0,10 c
Подсолнечник/CF	0,45 ± 0,03	0,50 ± 0,04	0,40 ± 0,04	1,35 ± 0,08 d
Вико-овёс/ (ЭТ)	0,90 ± 0,06	0,95 ± 0,07	0,90 ± 0,06	2,75 ± 0,14 a
Многол. травы (Контроль)–	1,00	1,00	1,00	3,00

Примечание: ИБО рассчитан как сумма трёх нормализованных баллов (контроль = 3,0). Фитотоксичность оценена по ингибированию роста редьки масличной; репродукция энхитреид – по коэффициенту репродукции относительно контроля; разложение остатков – по проценту потери массы за период до посева, нормированному аналогично. Значения в столбце ИБО, обозначенные разными буквами, достоверно различаются ($p < 0,05$).

Наилучшие показатели ИБО зафиксированы после вико-овсяного сидерата (2,75 балла), что свидетельствует о его детоксицирующем и биостимулирующем последействии. После подсолнечника, возделываемого по технологии Clearfield с десикацией, отмечено наиболее сильное угнетение всех изучаемых биологических параметров, выражающееся в минимальных значениях ИБО (1,35 балла), что на 51% ниже уровня оптимального варианта (ЭТ + сидерат). Такой эффект связан с комплексным воздействием остаточных количеств гербицидов имидазолинонового ряда, продуктов разложения десиканта (дикват) и специфичного состава растительных остатков подсолнечника.

Реакция почвенной мезофауны (энхитреиды) на агротехнологический пресс. Результаты стандартизированного теста на выживаемость и репродукцию Enchytraeus albidus однозначно продемонстрировали высокую чувствительность этой группы к технологической нагрузке. Влияние фактора «технология возделывания» было статистически значимым ($p < 0,001$) (табл. 3).

3. Выживаемость и репродукция Enchytraeus albidus в почвах, отобранных под озимой пшеницей в конце вегетационного сезона (M±m, n=4)

Технология/ Предшественник	Выживаемость взрослых, %	Ювенильные особи	Коэффициент репродукции*	Ингибирование репродукции, %
ЭТ/Вико-овёс	98 ± 2 a	185 ± 8 a	9,3 ± 0,4 a	7,0
ОТ/Оз. пшеница	92 ± 3 ab	162 ± 7 b	8,1 ± 0,3 b	18,9
ОТ/Подсолн-к (ОТ)	90 ± 4 b	148 ± 6 b	7,4 ± 0,3 b	25,9
ВТ/Оз. пшеница	85 ± 3 c	121 ± 5 c	6,1 ± 0,2 c	39,0
ВТ/Подсолнечник (CF)	78 ± 3 d	89 ± 4 d	4,5 ± 0,2 d	55,0
Многолетние травы	100	197	10,0	0

Примечание. Коэффициент репродукции = число ювенильных / число выживших взрослых. В пределах одного столбца значения, обозначенные разными буквами, достоверно различаются ($p < 0.05$).

Наблюдается чёткий негативный градиент от ЭТ к ВТ по всем показателям. На варианте ОТ после стандартного предшественника ингибирование репродукции составило ~19%, указывая на хронический стресс, вызванный сочетанием механического нарушения и умеренной химической нагрузки. На варианте ВТ репродуктивная функция была подавлена на 39–55%, соответствуя критическому уровню хронической токсичности по литературным данным. Наиболее драматическое снижение показателей (выживаемость 78%, ингибирование репродукции 55%) зафиксировано в варианте ВТ на фоне последействия подсолнечника по технологии Clearfield, что подтверждает ранее выявленный фитотоксический фон и свидетельствует о синергетическом негативном эффекте двух интенсивных технологий в последовательных звеньях севооборота. Почвенная мезофауна, в отличие от микроорганизмов, не способна к быстрой адаптации, что делает её идеальным индикатором долгосрочного кумулятивного пресса.

Выявлена достоверная положительная корреляция между коэффициентом репродукции энхитреид и скоростью разложения растительных остатков ($r = 0,87$, $p<0,01$), а также отрицательная корреляция с фитотоксичностью для редьки масличной ($r = –0,79$, $p < 0,01$; по модулю $r \geq 0,79$). Это подтверждает функциональную связь между нарушением зооценоза, замедлением деструкции и ростом общего эдафического стресса.

Динамика разложения растительных остатков в звеньях севооборота. Результаты весовой оценки потери массы растительных остатков за период экспозиции (9–10 месяцев) выявили статистически значимое ($p < 0,001$) влияние как технологии основной культуры (пшеницы), так и вида/технологии предшественника на скорость деструкции.

Наблюдается выраженный контраст между традиционной (ОТ) и минимальной (ВТ) обработкой. В варианте ОТ разложение соломы пшеницы протекало наиболее интенсивно (потеря массы 70,5%, $k = 1,21$ год$^{-1}$), объясняясь эффективным перемешиванием остатков с почвой, аэрацией и стимуляцией микрофлоры. В варианте ВТ скорость

разложения собственной соломы была достоверно ниже (46,8%, k = 0,63 год$^{-1}$), что подтверждает гипотезу о функциональном угнетении деструкционного комплекса при высоких химических нагрузках, коррелирующем с подавлением энхитреид .

Критическую роль сыграла технология возделывания предшественника. Остатки подсолнечника, выращенного по системе Clearfield, разлагались наиболее медленно как самостоятельно (41,3%), так и в качестве фона для последующего разложения соломы пшеницы (38,9%). Это указывает на формирование биологически инертного пула органического вещества, нарушающего нормальный ход биогеохимических циклов. Напротив, сидеральный пар (вико-овёс) способствовал более активному разложению последующих остатков.

Обнаружена сильная положительная корреляция между скоростью разложения (k) и репродукцией энхитреид ($r = 0,91$, $p < 0,001$), а также отрицательная корреляция между разложением и фитотоксичностью ($r = –0,85$, $p < 0,01$). ЭТ демонстрирует сбалансированный, хотя и несколько замедленный, цикл. ОТ обеспечивает интенсивную минерализацию с риском потерь органического углерода. ВТ, особенно на фоне токсичного предшественника, ведёт к формированию состояния метаболического замедления почвенного сообщества, когда скорость трансформации органического вещества и восстановление биологической активности существенно отстают от уровня поступления субстрата.

Интегральный многомерный анализ и ранжирование технологий (PCA) по совокупности восьми ключевых параметров (длина корня редьки масличной и ячменя в конце сезона, выживаемость и репродукция энхитреид, скорость разложения остатков пшеницы и предшественника, значения ИБО по фону предшественника) показал чёткое разделение вариантов опыта на три функциональных кластера. Варианты с экстенсивной технологией на фоне сидерата и целинный контроль сгруппировались в область максимальной биологической сохранности, характеризуясь высокими значениями репродукции энхитреид, скорости разложения и минимальной фитотоксичностью. Высокоинтенсивная технология, особенно в сочетании с подсолнечником по системе Clearfield, формировала противоположный полюс с минимальными значениями большинства биологических функций и низким ИБО. Обычная технология занимала промежуточное положение, сочетая повышенную скорость минерализации с умеренным угнетением биоты, что отражает функциональный компромисс между продуктивностью и устойчивостью почвы.

4. Скорость разложения растительных остатков (% потери массы за 8–10 месяцев, M±m, n=4) в зависимости от технологии возделывания

Вариант технологий (культура/предшественник)	Потеря массы, %	Скорость разложения, k, год$^{-1}$
Оз.пш ЭТ / Вико-овёс (сидерат)	58,1 ± 2,6 b 61,5 ± 2,8 ab	0,87 ± 0,04 b 0,96 ± 0,04 ab
Оз.пш ОТ / Оз.пш ОТ	70,5 ± 3,2 a 68,2 ± 3,1 a	1,21 ± 0,06 a 1,15 ± 0,05 a
Оз.пш ВТ / Оз.пш ОТ	46,8 ± 2,1 c 68,2 ± 3,1 a	0,63 ± 0,03 c 1,15 ± 0,05 a
Подсолнечник (CF)/ Оз.пш ВТ	38,9 ± 1,7 d 41,3 ± 1,9 d	0,50 ± 0,02 d 0,53 ± 0,03 d
Подсолнечник (ОТ)/ Оз.пш ОТ	55,7 ± 2,5 b 68,2 ± 3,1 a	0,82 ± 0,04 b 1,15 ± 0,05 a
Контроль (мн. травы)	75,0 ± 3,4	1,39 ± 0,07

Примечание: В пределах группы значения, обозначенные разными буквами, достоверно различаются ($p < 0,05$).

Ранжирование вариантов по интегральному индексу биологического отклика позволило количественно оценить степень нарушения функционального состояния (табл. 5).

5. Ранжирование вариантов опыта с по интегральному индексу биологического отклика (ИБО) почвы на технологию возделывания пшеницы

Ранг	Вариант (технология/ предшественник)	ИБО (баллы)	Категория состояния
1	ЭТ / Вико-овёс (сидерат)	2,75 ± 0,14 a	Оптимальное. Сохранена функциональная целостность.
2	ОТ / Озимые зерновые	2,40 ± 0,12 b	Удовлетворительное. Умеренный стресс с компенсаторной минерализацией.
3	ОТ / Подсолнечник (ОТ)	1,95 ± 0,10 c	Напряжённое. Заметное угнетение биоты последействием предшественника.
4	ВТ / Озимые зерновые	1,65 ± 0,09 d	Критическое. Сильное угнетение функций, кумулятивный химический пресс.
5	ВТ / Подсолнечник (CF)	1,35 ± 0,08 d	Дисфункциональное. Синергетический эффект, риск долгосрочной деградации.
Контроль	Залежь / Многолетние травы	3,00	Эталонное.

Примечание: ИБО рассчитан как сумма трёх нормализованных баллов (контроль = 3,0). Значения, обозначенные разными буквами, достоверно различаются ($p < 0,05$). По аналогии с подходами к интегральным индексам биологического состояния почвы (ИПБС, SBQI), где нижняя треть шкалы рассматривается как зона экологического риска, значение ИБО < 1,5 условно принято как ориентировочный уровень критической дисфункции.

Наибольший вклад в ухудшение биологического состояния вносит высокоинтенсивная технология, снижая ИБО на 35–45% относительно оптимального варианта. При этом технология предшественника выступает мощным модератором: система Clearfield под подсолнечник усугубляет негативный эффект, приводя к дополнительному падению ИБО на 18% (1,65 против 1,35 баллов) даже при смене основной культуры. Полученные данные убедительно свидетельствуют о том, что поддержание биологического качества почвы требует системного подхода, учитывающего как минимизацию химического пресса в текущем цикле, так и грамотный подбор технологии возделывания предшественника в севообороте.

Выводы. Установлен выраженный градиент возрастания негативного воздействия на биологическое состояние агродерново-подзолистой почвы в ряду технологий возделывания озимой пшеницы: экстенсивная (ЭТ) → обычная (ОТ) → высокоинтенсивная (ВТ). Наиболее существенное угнетение всех изученных параметров (фитотоксичность, репродукция энхитреид, скорость деструкции) отмечено при ВТ, что свидетельствует о формировании дисфункционального состояния почвенной системы.

Выявлен кумулятивный характер воздействия высокоинтенсивной технологии, проявляющийся в статистически значимом усилении фитотоксического эффекта и подавления репродукции почвенной мезофауны к концу вегетационного сезона. Это указывает на эффект

«технологического шлейфа» и снижение буферной ёмкости почвы при длительном применении ВТ.

Доказано критическое опосредующее влияние предшественника и технологии его возделывания на биологический фон для последующей культуры. Последействие подсолнечника, выращенного по технологии Clearfield с десикацией, формирует наиболее неблагоприятные условия, вызывая синергетический негативный эффект в сочетании с ВТ и снижая интегральный индекс биологического отклика (ИБО) на 51% относительно оптимального варианта (ЭТ на фоне сидерата).

Установлена тесная функциональная взаимосвязь между репродукцией энхитреид, скоростью разложения растительных остатков и уровнем фитотоксичности ($r \geq 0{,}79$, $p \leq 0{,}01$). Подавление зооценоза является ключевым звеном в нарушении процесса деструкции, что при ВТ приводит к формированию состояния метаболического замедления почвенного сообщества – к накоплению биологически инертного пула органических остатков при их замедленной трансформации . Для целей агроэкологического мониторинга обоснована система индикаторов: в качестве наиболее чувствительных фитотест-объектов рекомендованы редька масличная (Raphanus sativus var. oleiformis) и ячмень (Hordeum vulgare); для оценки хронического токсического воздействия на почвенную фауну – энхитреиды (Enchytraeus albidus). Предложенный интегральный индекс биологического отклика является эффективным инструментом для количественного ранжирования агротехнологий, где значение ИБО < 1,5 служит диагностическим признаком критической дисфункции.

Полученные данные служат научно-методологической основой основой для разработки адаптивно-ландшафтных систем земледелия, предусматривающих недопущение последовательного применения интенсивных химических технологий в смежных звеньях севооборота и обязательное нормативно обоснованное включение биологических мелиорантов (сидераты, органические удобрения) для поддержания функциональной целостности почвенных экосистем.

Литература

1. *B. Ni, L. Xiao, D. Lin, T. Zhang, Q. Zhang, Y. Liu, Q. Chen, D. Zhu, H. Qian, M.C. Rillig, & Y.* Zhu, Increasing pesticide diversity impairs soil microbial functions, Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A. 122 (2) e2419917122, https://doi.org/10.1073/pnas.2419917122 (2025).
2. *Gómez-Sagasti M.T., Dorronsoro B., Fernández A., et al.* Evaluating the Tea Bag Index approach for different crop residue types // SOIL. 2024. Vol. 10. P. 407–421.
3. *Power A.G.* Ecosystem services and agriculture: Tradeoffs and synergies // Philos. Trans. R. Soc. B: Biol. Sci. 2010. Vol. 365. No. 1554. P. 2959–2971.
4. *Gunstone T., Gillings M., Glover D., et al.* Pesticides and Soil Invertebrates: A Hazard Assessment // Front. Environ. Sci. 2021. Vol. 9. P. 643847.
5. *Bhaduri D., Saha A., Desai S., et al.* A review on effective soil health bioindicators for ecosystem restoration and sustainability // Front. Microbiol. 2022. Vol. 13. P. 938481.
6. *Zhao R., Bai X., Wang Y., et al.* Understanding trade-offs and synergies among soil ecosystem functions in cultivated lands // Front. Environ. Sci. 2022. Vol. 10. P. 1063907.
7. *Kazarov E.A., Strelnikova T.V.* Biological testing of soil ecotoxicity: current approaches and prospects // J. Soil Sci. Agroecol. 2021. Vol. 54. No. 3. P. 245–258.
8. *Shi Z., Cheng G., Wang S., et al.* Effect of imazamox soil residue on rotational crops // Weed Sci. 2017. Vol. 65. No. 3. P. 336–349.
9. *Scholte S.S., Verhoeven F.P.M., Schulp C.J.E., et al.* Soil multifunctionality: Synergies and trade-offs in agricultural soils under different management practices // Landsc. Ecol. 2022. Vol. 37. No. 4. P. 1073–1089.
10. *Wubs E.R.J.* Benchmarking soil multifunctionality // SOIL. 2025. Vol. 11. No. 2. P. 609–625.
11. *Nunes M.R., Karlen D.T., Cambardella C.A., et al.* The soil health assessment protocol and evaluation applied to soil organic carbon // Soil Sci. Soc. Am. J. 2021. Vol. 85. No. 5. P. 1526–1538/
12. *Byková V.V., Shorobura E.I.* Negative effects of imidazolinone herbicides usage on soil biota and crop productivity // Экология. 2023. № 2. С. 98–107.
13. *Hu M., Ye T., Zhang M., et al.* Behavior of imidazolinone herbicide enantiomers in earthworm-soil microcosms: Degradation and bioaccumulation // Environ. Pollut. 2020. Vol. 261. P. 114476.
14. *Beaumelle L. et al.* Pesticide effects on soil fauna communities—A meta-analysis //Journal of Applied Ecology. – 2023. – Т. 60. – №. 7. – С. 1239-1253.
15. *Bardgett R. D., De Vries F. T., van der Putten W. H.* Soil biodiversity and ecosystem functioning //Microbial biomass: a paradigm shift in terrestrial biogeochemistry. – 2017. – С. 119-140.
16. *Yu B. et al.* Effects on soil microbial community after exposure to neonicotinoid insecticides thiamethoxam and dinotefuran //Science of the Total Environment. – 2020. – Т. 725. – С. 138328.
17. *Drocco C.* Assessment of the toxicity of pesticide mixtures on soil microorganisms: дис. – Université Bourgogne Franche-Comté, 2024.
18. *Kozlovskiy V.B., Karpachevskiy L.O.* Phytotoxicity assessment of pesticide-contaminated soils // Agrochemistry. 2019. Vol. 7. P. 45–58.
19. *Yin R. et al.* Land-use intensification reduces soil macrofauna biomass at the community but not individual level //Agriculture, Ecosystems & Environment. – 2022. – Т. 337. – С. 108079.
20. *Agathokleous E., Calabrese E. J.* Environmental toxicology and ecotoxicology: How clean is clean? Rethinking dose-response analysis //Science of the Total Environment. – 2020. – Т. 746. – С. 138769.
21. *Lehmann J., Bossio D.A., Kögel-Knabner I., et al.* The concept and future prospects of soil health // Nat. Rev. Earth Environ. 2020. Vol. 1. No. 10. P. 544–558. 10. P. 544–558.

DYNAMICS OF BIOLOGICAL FUNCTIONS OF SOIL IN CROP ROTATION UNDER THE INFLUENCE OF TECHNOLOGIES OF VARYING INTENSITY: A COMPREHENSIVE ASSESSMENT USING BIOTESTING METHODS

S.S. Ladan, Ph.D., Federal State Budgetary Institution "All-Russian Scientific Research Institute of Agrochemistry" named after D.N. Pryanishnikova", 127434, Russia, Moscow, st. Pryanishnikova, 31, E-mail: info@vniia-pr.ru

A quantitative analysis of the ability of agroecosystem soil to perform fundamental ecosystem functions under the influence of technological pressure of varying intensity was carried out. A comparative assessment of the impact of extensive (ET), conventional (CT), and high-intensive (HIT) winter wheat cultivation technologies on the biota of agro-sod-podzolic medium loamy soil was conducted using multimodel bioassay in seasonal dynamics (beginning and end of the growing season), considering the aftereffect of predecessors (winter cereals, sunflower under conventional and Clearfield technology, vetch-oats mixture). It was found that HIT causes a pronounced functional trade-off: the stimulation of short-term mineralization (mass loss of wheat residues in the CT variant – 70,5%) is achieved at the expense of inhibiting the habitat-forming function for mesofauna (inhibition of Enchytraeus albidus reproduction by 55%) and long-term humification (slowing down of predecessor residue decomposition in the HIT variant to 41,3%). A synergetic negative effect was revealed when combining HIT with the aftereffect of sunflower under the Clearfield system, leading to maximum suppression of all functions. In contrast, ET on a green manure background maintained a balanced functional profile. Based on a test battery (phytotesting with barley, buckwheat, sugar beet, sorghum, oilseed radish; zootest with enchytraeids; decomposition assessment), an Integral Biological Response Index (IBRI) was developed, allowing technologies to be ranked according to the degree of environmental risk. The results indicate a functional compromise in agroecosystems and the necessity of excluding the sequential application of intensive chemical technologies in crop rotation to preserve the biological regulation of soil fertility.

Keywords: functional trade-off, soil ecosystem functions, biological regulation of fertility, multimodel bioassay, winter wheat cultivation technologies, extensive, conventional, high-intensive, enchytraeids, plant residue decomposition, Integral Biological Response Index (IBRI), predecessor, Clearfield technology, agro-sod-podzolic soil.