УДК 632.51:632.954:504.5 DOI: 10.25680/S19948603.2026.150.18

ФУНКЦИОНАЛЬНАЯ ДОСТАТОЧНОСТЬ КОНТРОЛЯ СОРНЫХ РАСТЕНИЙ: КОНЦЕПЦИЯ ДВОЙНОГО ПОРОГА В АГРОФИТОЦЕНОЗЕ

С.С. Ладан, к.б.н., И.В. Ильюшенко, к.б.н.,
ФГБНУ «Всероссийский научно-исследовательский институт агрохимии имени Д.Н. Прянишникова»
127434, г. Москва, ул. Прянишникова, д. 31А, ecotox@vniia-pr.ru

Исследование выполнено по Государственному заданию № 0429-2024-0001

Оценка гербицидной обработки обычно сводится к биологической эффективности – снижению численности или массы сорных растений. Однако для управления агрофитоценозом важнее другой вопрос: достаточно ли снижено сегетальное давление, чтобы дальнейшее химическое вмешательство было агрономически, экологически и экономически оправдано. В статье предложены понятие функциональной достаточности контроля сорных растений и концепция двойного порога: нижняя граница определяется порогом вредоносности сорного компонента, верхняя – порогом экологически и технологически избыточного вмешательства. Материалом послужил 171 полевой опыт Московской области за 2019-2025 г. по пяти группам культур. Показано, что остаточная сырая масса сорных растений сама по себе слабо связана с реализацией урожая в сопоставлении с опытами с ручной прополкой (обобщенная зависимость практически не объясняет вариацию урожая). Сырая масса без учёта культуры не является достаточным предиктором реализации урожая в объединённой выборке ($R^2 \approx 0,03$); покультурный анализ выявляет умеренную отрицательную связь для озимой пшеницы ($R^2 = 0,45$) и ярового ячменя ($R^2 = 0,30$) при отсутствии связи для картофеля и рапса. Одинаковая масса остатка в различных культурах приводит к разным продукционным последствиям, что подтверждает культуроспецифичность функциональной достаточности и значимость сроков появления сорняков. Дополнительно выявлено расхождение между визуальной экспертной оценкой и формальным индексом достаточности: видимый остаток сорняков чаще воспринимается как недостаток контроля даже при сохранении урожая. Предложен сокращенный модельный контур оценки остаточного сегетального давления, задающий требования к дальнейшим опытам: динамические учеты засоренности, видовой состав, ручные контроли, оценку второй волны и сезонной пестицидной нагрузки.

Ключевые слова: функциональная достаточность контроля, остаточная засоренность, двойной порог, гербициды, порог вредоносности, экологическая цена обработки, критический период, вторая волна сорняков, реализация урожая.

Для цитирования: *Ладан С.С., Ильюшенко И.В.* Функциональная достаточность контроля сорных растений: концепция двойного порога в агрофитоценозе// Плодородие. – 2026. – №3. – С. 101-107. DOI: 10.25680/S19948603.2026.150.18.

Биологическая эффективность гербицида не исчерпывает агрономический результат обработки. Культура реагирует не на количество уничтоженных сорных растений, а на фактическое ослабление конкуренции в критические фазы онтогенеза. Поэтому одна и та же остаточная засоренность может иметь различное значение: ранний остаток в период формирования стеблестоя способен снижать урожай, тогда как поздняя вторая волна часто почти не влияет на урожай текущего года, но пополняет банк семян и повышает фитосанитарный риск последующих лет [1, 3, 4].

В регламентированной оценке гербицидов основное внимание уделяют обычно снижению численности или массы сорняков относительно засоренного контроля. Такой подход необходим, но недостаточен. Он отвечает на вопрос, насколько препарат подавил сорные растения, но не показывает, было ли достигнуто состояние, при котором дополнительное вмешательство уже не имеет агрономического смысла. В реальной системе защиты растений важен не идеал абсолютно чистого поля, а функционально достаточный уровень контроля, при котором урожай защищен, фитосанитарный риск приемлем, а дальнейшая обработка не создает избыточной экологической и экономической нагрузки.

В настоящей работе функциональная достаточность контроля рассматривается как управленческая категория, соединяющая урожайный результат, остаточное сегетальное давление, сроки появления сорняков, риск второй волны и цену дальнейшего вмешательства. В этом подходе «чистое поле» перестает быть самоцелью и становится одним из возможных, но не всегда рациональных технологических состояний.

Концептуальная идея работы состоит в переходе от одномерной оценки остаточной засоренности к логике двойного порога. Первый порог – классический порог вредоносности сорных растений. Его превышение означает, что сегетальный компонент способен вызвать существенные урожайные или фитосанитарные потери. Второй порог – порог экологически и технологически избыточного вмешательства (рис.1). За этой границей дополнительное подавление сорняков приносит меньше пользы, чем создает издержек: повышает пестицидную нагрузку, усиливает отбор устойчивых биотипов, увеличивает риск воздействия на нецелевые организмы и формирует экономически неоправданные затраты.

Функциональная достаточность находится в коридоре между этими двумя границами. Ниже порога вредоносности остаток сорных растений не требует обязательного химического подавления. Выше порога вредоносности вмешательство оправдано. Но при приближении к состоянию «чистого поля» дальнейшее снижение сорного компонента должно оцениваться уже не только через прибавку урожая, но и через экологическую цену обработки. Такой подход согласуется с логикой интегрированного управления сорняками и расширяет ее за счет включения порога избыточности [5, 6].

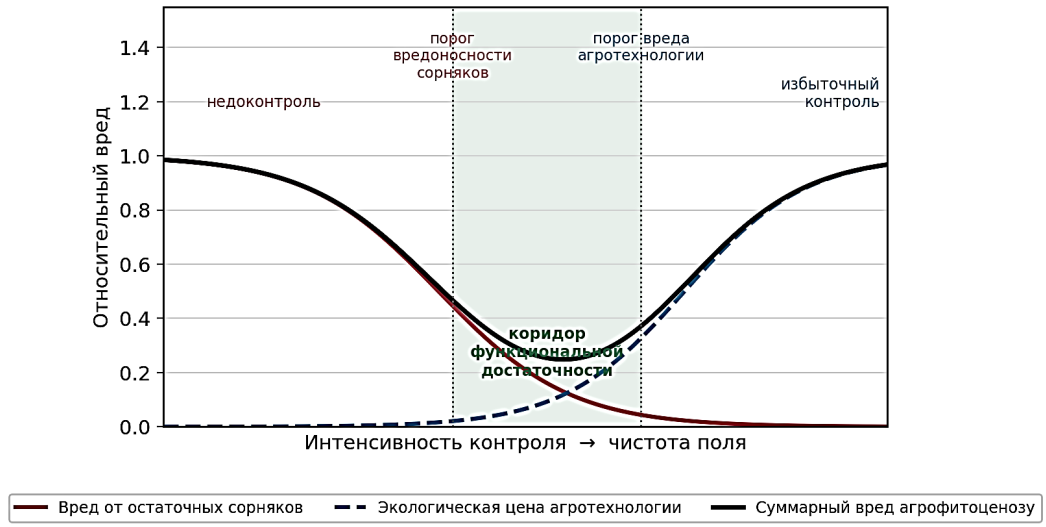

Рис. 1. Концепция двойного порога: функциональная достаточность как коридор между порогом вредоносности сорняков и порогом экологически избыточного вмешательства

Цель исследования – обосновать понятие функциональной достаточности контроля сорных растений и проверить на региональном массиве полевых опытов, может ли остаточная масса сорняков служить самостоятельным критерием достаточности гербицидной обработки.

Дополнительными задачами были сопоставление формальной оценки достаточности с визуальной экспертной оценкой и определение требований к данным, необходимым для последующего построения динамических моделей остаточного сегетального давления.

Методика. Материалом служили данные171 полевого опыта, проведенного в Московской области в 2019-2025 г. Опыты были сгруппированы по типу агрофитоценоза: картофель, кукуруза на силос, яровые зерновые, озимая пшеница и озимый рапс. В каждом опыте создавали варианты: засоренный контроль, вариант с гербицидами и вариант с ручной прополкой, как приближенный к чистому контролю (табл. 1). Определяли урожайность, численность и сырую массу остаточных сорных растений, наличие второй волны и, где возможно, видовой состав сегетального остатка. Под остаточным сегетальным давлением понимали сохраняющееся после обработки конкурентное и фитосанитарное воздействие сорного компонента агрофитоценоза.

Для оценки реализации урожая использовали индекс IRP:

$$IRP = (Y_H / Y_{WF}) \cdot 100, \quad (1)$$

где Y_H – урожайность гербицидного варианта, Y_{WF} – урожайность варианта ручной прополки. Индекс показывает, насколько гербицидный вариант приблизился к ручному контролю. $IRP_{norm} = \min (IRP / 100; 1)$

Остаточное сегетальное давление рассчитывали по сырой массе сорняков с логарифмированием:

$$RSP = \ln(1 + B / B_0), \quad (2)$$

где B – сырая масса остаточных сорных растений, г/м^2; $B_0 = 200$ г/м^2 – условный референс массы. Значение B_0, равное 200 г/м², принято как рабочий масштабный параметр, близкий к уровню заметного остаточного давления в полевых учётах (в дальнейшем подлежит уточнению). Такой вид индекса снижает влияние экстремально высоких значений и позволяет сопоставлять разные культуры.

1. Сводная характеристика опытного материала (2019-2025 г.)

Культура	Число опытов	Основные варианты	Основные учеты
Картофель	29	Засоренный контроль, гербицид; ручная прополка	Численность и масса сорных растений, урожай, вторая волна
Кукуруза на силос	28		Численность сорных растений, масса сорных растений, укос, вторая волна
Яровые зерновые	46		Численность и масса сорных растений, урожай, сроки
Озимая пшеница	44	Осенний/весенний контроль; гербицид; ручная прополка	Осенняя и весенняя засоренность, масса сорных растений, урожай
Озимый рапс	24	Засоренный контроль; гербицид; ручная прополка	Видовой состав, масса сорных растений, урожай, очаги

Для предварительной формальной оценки достаточности контроля использовали интегральный индекс функциональной достаточности контроля сорных растений – FSCI. Индекс рассматривался не как окончательно откалиброванный норматив, а как рабочий способ сопоставления опытов с разными культурами, уровнем остаточной засорённости и риском второй волны. Его назначение состояло в том, чтобы отделить случаи, где видимый остаток сорняков действительно сопровождался риском потери урожая или фитосанитарным риском, от случаев, где остаточная засорённость сохранялась визуально, но не имела существенного функционального значения.

В общем виде индекс рассчитывали как произведение показателя реализации урожая и штрафного множителя остаточного риска:

$$FSCI = IRP_{norm} \cdot (1 - R_{res}), \quad (3)$$

где $IRP_{norm} = IRP /100$ – нормированная реализация урожая относительно варианта ручной прополки; R_{res} – интегральный остаточный риск, изменяющийся от 0 до 1. $FSCI \in [0; 1]$. При $R_{res} = 0$ – остаточная засорённость не создает значимого дополнительного риска; при $R_{res} \rightarrow 1$ риск остатка приближается к критическому уровню.

Интегральный остаточный риск задавали как взвешенную сумму частных рисков:

$$R_{res} = w_1R_{mass} + w_2R_{wave} + w_3R_{seed} + w_4R_{resist} + w_5R_{patch}, \quad (4)$$

где R_{mass} – риск, связанный с остаточной массой сорных растений; R_{wave} – риск второй волны; R_{seed} – риск семенного возобновления; R_{resist} – риск отбора устойчивых биотипов; R_{patch} – риск очагового сохранения засорённости; w_1–w_5 – весовые коэффициенты, сумма которых равна 1.

Все частные риски предварительно нормировали в диапазоне от 0 до 1. На данном этапе весá задавались экспертно, поскольку исходный массив не содержал полного набора динамических, видовых и семенных показателей для независимой калибровки. Поэтому FSCI использовался как предварительный аналитический индекс, а не как нормативный пороговый показатель.

Для интерпретации результатов применяли три категории: FSCI ≥ 0,80 – функционально достаточный контроль; 0,62 ≤ FSCI < 0,80 – условно достаточный контроль; FSCI < 0,62 – недостаточный контроль. Указанные границы являются рабочими и подлежат последующей калибровке на независимом массиве опытов. В настоящей работе они использованы для первичного сопоставления формализованной оценки с визуальной экспертной оценкой и для выявления случаев, где видимый остаток сорняков не совпадал с функциональным риском для урожая. Экспертная оценка выполнялась по полевым журналам и визуальной категории состояния варианта после учета засорённости; оценка носила производственно-экспертный характер и не рассматривалась как независимый эталон.

Результаты и их обсуждение. Остаточная масса сорняков как самостоятельный показатель оказалась недостаточной для объяснения урожайного результата. При подгонке обобщенной зависимости IRP = 100 · exp(-γ · RSP) связь между RSP и реализацией урожая была слабой; фактически один показатель остаточной массы почти не объяснял различия между опытами. Это означает, что одинаковая масса сорного остатка в разных культурах имеет неодинаковое значение. Например, остаток сорных растений около 560 г/м^2 в картофеле не сопровождался снижением урожая по сравнению с ручной прополкой, тогда как близкая по величине масса в яровом ячмене соответствовала заметному снижению реализации урожая. Следовательно, достаточность определяется не количеством сорняков как таковым, а сочетанием культуры, сроков появления сорняков, конкурентной способности агрофитоценоза и состава второй волны.

По объединённому массиву пяти культур подгонка IRP = 100·exp(−γ·RSP) даёт γ ≈ 0,10, RMSE ≈ 6,7 п.п. и R^2 ≈ 0,03 (рис. 2).

Сам по себе этот результат не означает, что масса остатка не связана с реализацией урожая; он означает, что RSP без идентификатора культуры является недостаточным предиктором в объединённой выборке, где культурные группы систематически различаются по конкурентной способности и критическим периодам.

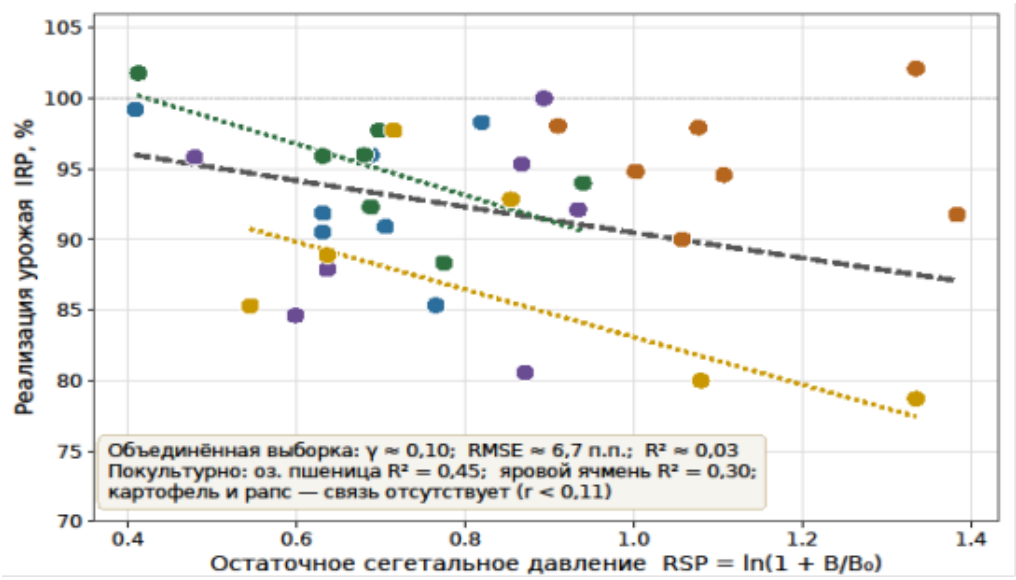

Рис. 2. Связь остаточного сегетального давления RSP и реализации урожая IRP по группам культур

Картофель
Кукуруза на силос
Озимая пшеница
Озимый рапс
Яровой ячмень
Обобщённая подгонка IRP = 100·exp(−γ·RSP)

Внутрикультурный анализ это подтверждает: для озимой пшеницы r = −0,67 (R^2 = 0,45), ярового ячменя r = −0,54 (R^2 = 0,30) наблюдается умеренная отрицательная связь: чем выше давление остатка, тем ниже реализация урожая. Для картофеля и озимого рапса связь практически отсутствует (r < 0,11), что указывает на доминирование иных факторов – пространственной неоднородности, очаговости засорения и сроков появления сорняков. Одинаковая сырая масса в разных культурах закономерно даёт несходный результат: картофель при RSP ≈ 1,34 реализует более 100% варианта РП, тогда как яровой ячмень при той же нагрузке — около 79%. Это прямо подтверждает основной тезис: достаточность определяется культуроспецифичной конкурентной способностью и сроками появления сорняков, а не абсолютным количеством остатка. Одномерный «остаточный» критерий несостоятелен не потому, что масса биологически нейтральна, а потому что её интерпретация без культурного контекста лишена смысла.

2. Культуроспецифичность функциональной достаточности контроля сорных растений в фитоценозах сопоставимой плотности

Культура, год	Сырая масса остатка, г/м²	RSP	IRP, %	Категория FSCI*	Функциональная интерпретация
Картофель, 2024	560	1,34	102,1	Условно достаточная	Высокая остаточная масса не сопровождалась потерей урожая относительно ручной прополки; риск связан не с текущим урожаем, а с семенным возобновлением поздней волны
Яровой ячмень, 2019	560	1,34	78,7	Недостаточная	Та же масса остатка, что и в картофеле, сопровождалась выраженным снижением реализации урожая; для яровых зерновых ранний или среднесезонный остаток функционально опаснее
Озимая пшеница, 2021	102	0,41	101,8	Достаточная	Низкое остаточное давление и высокая конкурентоспособность травостоя обеспечили полную реализацию урожая; дополнительная обработка функционально не оправдана
Озимая пшеница, 2024	202	0,70	97,7	Достаточная	Умеренный остаток не имел значимого урожайного эффекта; пример достаточности при наличии видимой, но функционально слабой засоренности
Яровой ячмень, 2024	297	0,91	73,7	Недостаточная	Даже умеренная масса остатка сопровождалась существенной потерей урожая, что указывает на высокую чувствительность культуры к остаточной конкуренции
Озимый рапс, 2022	278	0,87	80,6	Недостаточная	Остаточная масса была не максимальной, но урожайная реализация снижена; вероятна роль очаговости, разреженности стояния и ранней конкуренции
Кукуруза на силос, 2025	101	0,41	99,2	Условно достаточная	Низкая масса остатка и высокая реализация урожая показывают снятие текущего урожайного риска, однако для силосной кукурузы сохраняется необходимость оценки второй волны и семенного риска

* Категория рассчитана по предварительным экспертным порогам FSCI и не рассматривается как нормативная оценка.

Эти контрастные ситуации показывают, что функциональная достаточность не совпадает с абсолютной величиной остаточной массы. Наиболее показательно сопоставление картофеля и ярового ячменя: при одинаковой сырой массе остатка 560 г/м² картофель в 2024 г. реализовал 102,1 % урожая относительно урожая на контроле с ручной прополкой, тогда как яровой ячмень в 2019 г. – только 78,7 %. Следовательно, один и тот же уровень остаточного сегетального давления может быть функционально допустимым в одной культуре и недостаточным в другой (табл. 3.). Это подтверждает необходимость культуроспецифичной оценки, учитывающей конкурентную способность культуры, фазу появления сорняков, вторую волну и семенной риск.

Следует подчеркнуть, что FSCI в данной работе не использовали как самостоятельный доказанный норматив достаточности. Его роль была иной: он служил формализованной рамкой для сопоставления урожайной реализации и остаточных рисков.

Поэтому полученные категории следует рассматривать как предварительную структуризацию опытного материала. Их значение состоит не в окончательном присвоении полю статуса «достаточно» или «недостаточно», а в демонстрации того, что одинаковый видимый остаток сорных растений может иметь неодинаковую функциональную цену в разных культурах. Формальная оценка по FSCI в целом согласовывалась с агроэкологией культур (табл. 4).

3. Анализ связи RSP с реализацией урожая IRP (n = 7 лет на группу) по культурам

Группа культур	r (Пирсон)	R^2	Связь
Озимая пшеница	−0,67	0,45	Умеренная отрицательная
Яровой ячмень	−0,54	0,30	Умеренная отрицательная
Кукуруза на силос	−0,37	0,14	Слабая отрицательная
Озимый рапс	+0,10	0,01	Отсутствует
Картофель	+0,07	0,01	Отсутствует
Объединённая выборка	−0,16	0,03	$R^2 \approx 0$ — слабая вследствие объединения разнородных культур

4. Сводная интерпретация функциональной достаточности по группам культур

Группа культур	Типичная оценка FSCI	Агрономическая интерпретация	Главный остаточный риск
Картофель	Условно достаточная	Высокая реализация урожая при заметном междурядном остатке	Семенной риск позднеяровых видов; необходимость оценки второй волны
Кукуруза на силос	Условно достаточная	Опасен ранний остаток; поздняя волна слабее влияет на текущий укос	Семенное возобновление до уборки; риск в последующих культурах
Яровые зерновые	Неустойчивая, от условной до недостаточной	Урожай чувствителен к ранней конкуренции, особенно при разреженном стеблестое	Потери урожая при умеренной массе остатка
Озимая пшеница	Чаще достаточная или условно достаточная	Плотный травостой компенсирует поздний остаток	Низкий урожайный риск поздней волны
Озимый рапс	Условно достаточная	Результат зависит от равномерности стояния и очагов сорняков	Очаговый риск и семенное возобновление

Наиболее устойчивую достаточность демонстрировала озимая пшеница, где плотный травостой и раннее смыкание посевов снижали значение позднего остатка. Картофель, кукуруза на силос и озимый рапс чаще попадали в область условной достаточности: урожай мог быть сохранен, но семенной риск второй волны и очаговость требовали

дополнительной оценки. Наиболее проблемной группой были яровые зерновые, особенно при раннем остатке и сниженной конкурентной способности культуры.

Полученные результаты подтверждают главный тезис работы: остаточная засоренность не может оцениваться вне контекста культуры и времени появления сорняков. Для густопокровных и озимых культур поздний слабый остаток часто не представляет существенного урожайного риска. Для пропашных культур и разреженных агрофитоценозов тот же остаток может быть важен не столько для текущего урожая, сколько для семенного возобновления и будущего фитосанитарного состояния поля. Поэтому функциональная достаточность должна учитывать как минимум два горизонта: урожайный риск текущего года и риск последующих лет, связанный с банком семян.

Сравнение формальной и визуальной оценок достаточности выявило одностороннее расхождение: визуальная экспертная категория не относила к полностью достаточным ни один вариант при наличии видимого остатка сорняков, тогда как формальный индекс в отдельных случаях признавал такие варианты достаточными (рис. 3, А). В остальном распределения категорий близки.

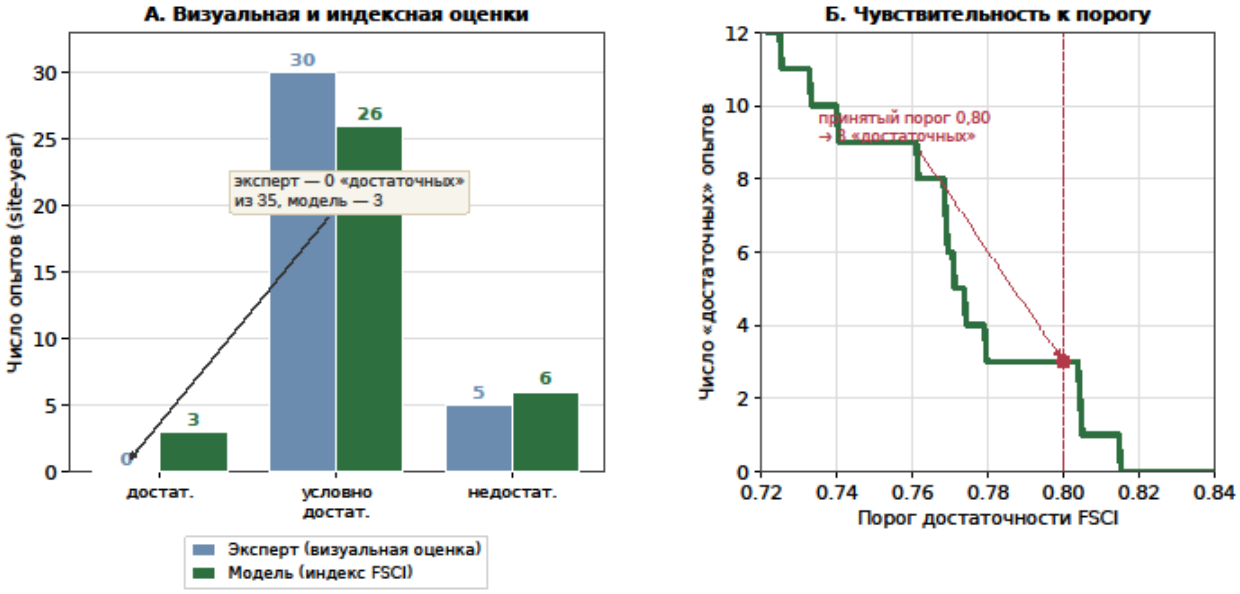

Рис. 3. Сопоставление визуальной экспертной и формальной оценки FSCI

Этот результат требует прямой методической оговорки и не может трактоваться ни как доказательство визуального смещения, ни как превосходство индекса. Рисунок следует рассматривать как концептуальную иллюстрацию этой гипотезы – согласующуюся с известной вариабельностью глазомерных оценок подавления сорняков и их слабой связью с урожаем, – но не как её эмпирическое доказательство. Дополнительно отнесение варианта к группе «достаточных» чувствительно к выбранному порогу индекса (рис. 3, Б): при пороге FSCI 0,80 таких вариантов три, при 0,76 – девять, при 0,82 – ни одного.

Вместе с тем, рисунок выявляет содержательный методический эффект: визуальная оценка склонна смешивать эстетическую чистоту поля с функциональной достаточностью контроля. Ценность формализованного индекса не в большей «точности» – эталона истинной достаточности пока нет, – а в том, что он делает основания решения прозрачными и воспроизводимыми. Строгая проверка гипотезы требует независимых глазомерных оценок нескольких экспертов и эталона достаточности (возврат семян в банк и засорённость следующего сезона). Концепция двойного порога позволяет изменить саму постановку задачи. Вместо вопроса «сколько сорняков осталось?» предлагается вопрос «нужна ли еще одна обработка?». Ответ зависит от того, находится ли остаточный риск выше порога вредоносности и превышает ли ожидаемая польза от обработки ее эколого-экономическую цену. В этом смысле чистое поле является не абсолютным критерием качества защиты, а технологическим состоянием, которое должно быть оправдано. Если урожайный риск снят, семенной риск невелик, а дополнительная обработка увеличивает пестицидную нагрузку и давление отбора устойчивости, то дальнейшее вмешательство становится функционально избыточным. Для иллюстрации операционализации второго порога рассмотрим группу препаратов, типичных для Нечерноземья (табл.5).

5. Оценка экологической нагрузки типичных гербицидов Нечерноземья (EIQ-подход)

Действующее вещество	EIQ	DT50, дн.	Применение	Уровень нагрузки
Клетодим	14,8	2	Злаковые сорняки	Низкий
Флуроксипир	12,1	20	Зерновые, пропашные	Низкий
2,4-Д к-та	18,5	10	Зерновые	Низкий
Трибенурон-метил	19,2	7	Зерновые	Низкий
Глифосат	15,3	47	Широкий спектр	Низкий
Метамитрон	22,1	30	Картофель	Средний
Метсульфурон-метил	27,4	40	Зерновые	Средний
Имазетапир	28,3	90	Соя, горох	Средний
Хлорсульфурон	34,2	60	Зерновые	Высокий
Прометрин	38,6	90	Картофель	Высокий

Примечание. Источник EIQ: Kovach J. et al. A method to measure the environmental impact of pesticides. New York's Food and Life Sciences Bulletin. 1992;139:1–8; обновлённые значения — база Cornell University, 2023

Экологический индекс вреда EIQ [8] объединяет токсичность для работников, потребителей сельхозпродукции, нецелевых организмов и поведение в среде в единый безразмерный показатель. EIQ выбран не как нормативный российский показатель, а как иллюстративный международный интегральный индекс для демонстрации структуры второго порога. Препараты разделяются на три уровня нагрузки: низкий (EIQ < 20) – трибенурон-метил (19,2), клетодим (14,8), флуроксипир (12,1); средний (EIQ 20–30) – метамитрон (22,1), метсульфурон-метил (27,4), имазетапир (28,3); высокий (EIQ > 30) – хлорсульфурон (34,2), прометрин (38,6). Сочетание EIQ с периодом полураспада DT50 задаёт почвенно-временной след обработки: прометрин (EIQ = 38,6, DT50 = 90 дн.) несёт существенно большую нагрузку, чем трибенурон-метил (EIQ = 19,2, DT50 = 7 дн.), даже при одинаковой биологической эффективности. Наибольшее значение второго порога – уровень EIQ·DT50, при превышении которого накопленный экологический вред агроландшафту перевешивает фитосанитарный риск остатка, т.е. подлежит установлению на основании независимых экотоксикологических данных. В рамках настоящей работы приведённый расчёт носит иллюстративный характер и формализует структуру второго порога, но не задаёт его количественное значение.

Особое значение имеет различие между довсходовыми и послевсходовыми гербицидами. Довсходовые препараты создают почвенный экран и могут подавлять последующие волны всходов, но одновременно формируют более длительный почвенно-временной след. Послевсходовые обработки эффективны против уже вегетирующих сорняков, но обычно слабее контролируют новую волну. Поэтому экологическая цена достаточности должна формироваться не по факту одного прохода, а по суммарной сезонной нагрузке и длительности остаточного действия.

Предложенный модельный контур следует рассматривать как методическую рамку для следующего этапа исследований. Он показывает, каких данных не хватает классическим схемам полевых испытаний. Обычные учеты, выполненные 1-2 раза за сезон, плохо фиксируют момент появления сорняков, длительность конкуренции, видовую структуру второй волны и семенную продуктивность. Между тем, именно эти параметры определяют является ли остаток функционально допустимым. Для перехода от концепции к расчетной модели необходимы: подекадные учеты, контроли с повторяющимся ручным удалением и учетом сорных растений и, видовой состав остатка, пространственная оценка очагов и учет пестицидной нагрузки за сезон.

Однако данное исследование содержит несколько ограничений. Во-первых, исследование одно – региональное и основано на опытах Московской области, поэтому перенос выводов на другие агроклиматические зоны требует проверки. Во-вторых, использовалась сырая масса сорняков, которая чувствительна к оводненности растений и погодным условиям. В-третьих, FSCI пока основан на экспертно заданных весах и порогах, поэтому требует независимой калибровки и анализа чувствительности. В-четвертых, визуальная экспертная оценка должна быть дополнительно стандартизирована: необходимо указать число экспертов, критерии, повторяемость и степень согласованности оценок. Наконец, динамические модели остаточного сегетального давления в настоящей работе не валидированы и используются только как контур будущей методики.

Выводы. Главный методический вывод состоит в том, что новый критерий достаточности требует иной схемы полевого опыта. Для оценки функциональной достаточности мало знать массу сорняков за один срок. Необходимы данные о времени появления остатка, видовой структуре, второй волне, семенной продуктивности и урожайной реализации относительно ручной прополки. Перспективная схема должна включать засоренный контроль, гербицидный вариант, ручную прополку (чистый контроль), подекадные учеты засоренности, регистрацию сроков смыкания культуры, учет поздней волны и оценку потенциального пополнения банка семян. Только при таком дизайне возможно перейти от экспертного индекса к калиброванной модели принятия решений.

Функциональная достаточность контроля сорных растений является более содержательным критерием оценки гербицидной обработки, чем простое снижение численности или массы сорняков. Она показывает достигнуто ли такое состояние агрофитоценоза, при котором дополнительное химическое вмешательство уже не оправдано с агрономической, экологической и экономической точек зрения. Анализ 171 полевого опыта Московской области показал, что остаточная масса сорняков сама по себе слабо объясняет реализацию урожая, а значение остатка определяется культурой, сроками появления сорняков и риском второй волны. Концепция двойного порога позволяет рассматривать чистое поле не как универсальную цель, а как технологическое состояние, требующее обоснования. Дальнейшее развитие подхода связано с калибровкой FSCI, учетом сезонной пестицидной нагрузки, анализом чувствительности весов и переходом к динамическим моделям остаточного сегетального давления.

В заключении необходимо выделить несколько концептуальных постулатов:

1. Биологическая эффективность гербицида не является достаточным критерием качества контроля сорных растений, поскольку не отражает урожайную реализацию, сроки появления остатка и риск второй волны.

2. Остаточная сырая масса сорняков в объединенном массиве опытов слабо связана с реализацией урожая относительно ручной прополки; поэтому одномерный массовый критерий не может служить универсальным порогом достаточности.

3. Функциональная достаточность должна оцениваться культуроспецифично, с учетом конкурентной способности культуры, критического периода, видового состава и семенного риска поздней волны.

4. Визуальная экспертная оценка склонна занижать достаточность при наличии видимого остатка сорняков; предварительный индекс FSCI делает основания решения более прозрачными, однако его весовые коэффициенты и пороговые значения требуют независимой калибровки и анализа чувствительности.

5. Концепция двойного порога задает перспективную рамку для интегрированной защиты растений: дальнейшая обработка оправдана только тогда, когда риск остатка превышает эколого-экономическую цену вмешательства.

Литература
1. *Knezevic S.Z., Evans S.P., Blankenship E.E., Van Acker R.C., Lindquist J.L.* Critical period for weed control: the concept and data analysis. Weed Science. 2002;50:773-786.
2. *Cousens R. A* simple model relating yield loss to weed density. Annals of Applied Biology. 1985;107(2):239-252.
3. *Ramesh K., Kumar S.V., Upadhyay P.K., Chauhan B.S.* Revisiting the concept of the critical period of weed control. The Journal of Agricultural Science. 2021;159(9-10):636-642.
4. *Geddes C.M., Davis A.S.* The critical period for weed seed control: a proposed framework to limit weed seed return. Weed Research. 2021;61(4):282-287.
5. *Chauhan B.S.* Grand challenges in weed management. Frontiers in Agronomy. 2020;1:3.
6. *Brühl C.A., Zaller J.G.* Biodiversity decline as a consequence of an inappropriate environmental risk assessment of pesticides. Frontiers in Environmental Science. 2019;7:177.
7. *Purcell W., Neubauer T.* Digital twins in agriculture: a state-of-the-art review. Smart Agricultural Technology. 2023;3:100094.
8. *Kovach J., Petzoldt C., Degni J., Tette J.* A method to measure the environmental impact of pesticides. New York's Food and Life Sciences Bulletin. 1992;139:1–8.

FUNCTIONAL SUFFICIENCY OF WEED CONTROL: A DUAL-THRESHOLD CONCEPT IN AGROPHYTOCENOSES

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

Herbicide treatments are commonly assessed by biological efficacy – the reduction of weed density or biomass. For agrophytocenosis management, however, the more relevant question is whether segetal pressure has been reduced sufficiently for any further chemical intervention to be agronomically, ecologically and economically justified. We propose the concept of functional sufficiency of weed control and a dual-threshold framework: the lower boundary is set by the weed harmfulness threshold, and the upper boundary by the threshold of ecologically and technologically excessive intervention. The study was based on 171 field experiments from the Moscow region (2019–2025) across five crop groups. Residual fresh weed biomass without crop identity was found to be a weak predictor of yield realization in the pooled dataset ($R^2 \approx 0.03$); within-crop analysis revealed a moderate negative relationship for winter wheat ($R^2 = 0.45$) and spring barley ($R^2 = 0.30$), with no meaningful association for potato or oilseed rape. The same residual biomass produced different yield outcomes across crops, confirming the crop-specificity of functional sufficiency and the importance of weed emergence timing. A systematic discrepancy was identified between visual expert assessment and the formal sufficiency index (FSCI): visible weed residuals were consistently perceived as insufficient control even when yield was well maintained. A condensed modelling framework for residual segetal pressure is proposed, specifying data requirements for future experiments: decadal weed surveys, species composition records, manual controls as time series, second-flush evaluation and seasonal pesticide load accounting.
Keywords: functional sufficiency of weed control; residual weeds; dual threshold; herbicides; harmfulness threshold; ecological cost; critical period; second weed flush; yield realization.