

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ГРАНИЦЫ УЛЬТРАМАЛООБЪЕМНОГО ПРИМЕНЕНИЯ ПЕСТИЦИДОВ

А.Е. МАРКЕВИЧ¹, И.С. КРУК²

¹ Белорусская государственная сельскохозяйственная академия, Горки, Республика Беларусь

² Белорусский государственный аграрный технический университет, Минск, Республика Беларусь

Статья посвящена теоретическому обоснованию технологических границ УМО применения пестицидов. Анализ полидисперсного и монодисперсного опрыскивания выполнен с использованием метода статистических тестов (Монте-Карло).

Article is devoted to theoretical substantiation of technological modes of ULV applications of pesticides. The analysis of a polydisperse and monodisperse spray pattern is made with use of a method of statistical tests (Monte-Carlo).

Введение

Исходя из применяемых в настоящее время на полевых культурах норм внесения рабочей жидкости по ГОСТ-27858 для штанговых опрыскивателей принята следующая классификация: ультрамалообъемное (УМО) – до 25 л/га, малообъемное (МО) – 75...200 л/га; полнообъемное – 200...300 л/га. Ультрамалообъемное опрыскивание является прогрессивным способом применения агрохимикатов. Исследования этого способа проводились во многих странах с конца 60-х годов. В 80-х в этом направлении исследований выделилась ветвь, создавшая основы новой технологии монодисперсного ультрамалообъемного (ММО) применения пестицидов (CDA – controlled droplet application).

Преимущества технологии УМО состоят в следующем:

- исключается процесс приготовления рабочей жидкости;
- производительность опрыскивателя увеличивается более чем на 60 % по сравнению с малообъемным опрыскиванием за счет повышения коэффициента использования времени смены;
- повышается качество обработки и снижаются потери препарата за счет применения распылителей (при ММО), обеспечивающих близкий к монодисперсному распыл.

Недостатки:

- происходит большой снос рабочей жидкости. При скорости ветра около 3 м/с количество сносимой распыленной жидкости по отношению к количеству осевшей на ширине захвата составляет от 20 до 50 %;
- возникают сложности в дозировании препарата: к каждому распылителю должны подаваться равные количества жидкости, а расход жидкости через распылители зависит от ее вязкости, которая меняется с изменением температуры окружающей среды;
- сложен контроль за работой распылителей из-за плохой видимости факела распыла;
- вследствие высокой агрессивности препаратов для УМО требуется применение высококачественных, коррозионностойких материалов для изготовления узлов опрыскивателя;
- ассортимент препаратов для УМО в настоящее время крайне мал.

Все эти недостатки в конечном счете резко увеличивают стоимость машины и себестоимость работ по защите растений.

Некоторые специалисты по защите растений, агрономы-практики предпринимают попытки использовать УМО-технологии для применения обычных пестицидов в концентрированном виде (игнорируя рекомендации разведения препарата водой до оптимальной концентрации). При этом используются обычные малорасходные гидравлические распылители, образующие полидисперсный распыл, и обработка проводится на повышенных скоростях (зачастую применяется сельскохозяйственная авиация). Насколько оправданы такие технологические приемы? Теоретическому обоснованию УМО-технологии посвящена эта статья.

Методы исследований

Основным фактором, влияющим на эффективность действия препарата, является степень покрытия обрабатываемой поверхности рабочей жидкостью. Этот показатель особенно важен при применении пестицидов контактного действия.

Степень покрытия поверхности U определяется по формуле:

$$U = S_n / S_0, \quad (1)$$

где S_n – площадь, покрытая каплями; S_0 – общая площадь объекта обработки.

Минимальное значение этого показателя, при котором пестицид может эффективно работать, назовем критической степенью покрытия $U_{кр}$. Зависит он от многих управляемых (размер осевших капель, густота покрытия поверхности, расположение следов капель) и неуправляемых факторов, среди которых – вид пестицида, фаза развития и свойства поверхности растений, механизм действия пестицида, температура и влажность воздуха и другие.

Размер образуемых распылителями капель – случайная величина, подчиненная логарифмически-нормальному закону распределения [1], что подтверждается нашими исследованиями распылителей для сельскохозяйственных опрыскивателей [2]. В этих условиях количество капель на единице площади поверхности будет также случайной величиной при фиксированной норме внесения ра-

бочей жидкости. Капли располагаются на обрабатываемой поверхности так, что координаты центров их следов распределены по закону равной вероятности. Следы капель могут перекрываться, приводя к уменьшению степени покрытия. Таким образом, степень покрытия является функцией нескольких случайных величин, каждая из которых имеет свой закон распределения.

Несмотря на большое количество исследований, посвященных листовой абсорбции пестицидов и других физиологически активных веществ, вопрос о механизме поступления в растения этих соединений остается до конца не выясненным. В связи с этим в литературе практически нет данных по величине критической степени покрытия и ее связи с различными внешними факторами. Удалось обнаружить лишь некоторую информацию [3], связанную с критической степенью покрытия для гербицидов, используемых для уничтожения плохо смачиваемых сорных растений (коэффициент растекания ≈ 1). По этим данным при использовании системных гербицидов необходимо обеспечить степень покрытия не менее 1,0 %, полусистемных – не менее 2,5 %, контактных – не менее 5,0 %.

Задача сводится к необходимости получения функции распределения степени покрытия поверхности и ее числовых характеристик. Решение задачи аналитическими методами неприемлемо из-за громоздкости получаемых формул и чрезвычайных трудностей при их применении для решения практических задач. Кроме того, точность получаемых результатов низка по причине необходимости принятия ряда допущений.

Для решения поставленной задачи нами был использован метод статистических испытаний (Монте-Карло). Суть метода состоит в следующем: вместо вычисления характеристик распределения степени покрытия, сложным образом зависящих от ряда случайных факторов, определим их с помощью так называемого «розыгрыша». Идею «розыгрыша» можно пояснить на следующем примере: предположим, проводится сто опытов, когда площадка единичной площади обрабатывается одинаковым количеством жидкости, раздробленной на капли. Размеры капель – случайная величина, но характеристики распределения этой случайной величины в каждом опыте неизменны. Капли оседают на площадку хаотически, т.е. координаты центров их следов – величина случайная, распределенная равномерно в интервале, равном длине стороны площадки. Измерив в каждом опыте степень покрытия, мы получим числовой вектор, анализируя который легко получить экспериментальную функцию распределения и ее числовые характеристики. Реализация такого «розыгрыша» обычными методами с помощью лабораторных установок невозможна ввиду огромных затрат времени на измерение и анализ степени покрытия (4–5 чел.-ч/см²). Поэтому задача была решена с помощью компьютера. Разработанная нами компьютерная программа обеспечивала выработку капель случайных диаметров, распределенных по заданному статисти-

стическому закону, и случайным образом располагала эти капли на объекте обработки. Суммарный объем капель соответствовал заданной норме внесения. Затем анализ битовой карты обработанной поверхности позволил определить степень покрытия и количество элементарных площадок, покрытых двумя и более каплями. Каждый опыт выполнялся в 100 кратной повторности.

С точки зрения ведущих фирм, производящих ядохимикаты, и научно-исследовательских центров для защиты сельскохозяйственных растений, рекомендуется использовать распыл с медианно-массовым диаметром (ММД) капель не более 600 мкм [4]. С учетом этого целесообразно провести исследование по определению степени покрытия для ММД распыла от 100 до 600 мкм в УМО-диапазоне норм внесения от 1 до 25 л/га. Количественной оценкой показателя полидисперсности K_p примем соотношение медианно-массового и медианно-числового диаметров капель. Современные гидравлические распылители обеспечивают соотношение (ММД / МЧД) = 1,5 – 4. Нами проведены опыты для соотношений (ММД / МЧД) = 1, 2, 3, 4. В случае (ММД / МЧД) = 1 имеем монодисперсный распыл. С увеличением соотношения увеличивается диапазон разброса размеров капель.

При реализации метода Монте-Карло использовались теоретические распределения размеров капель, полученные по исходным заданным числовым характеристикам – ММД и МЧД. Однако логарифмически-нормальное распределение некоторой случайной величины X имеет правый предел $+\infty$, т.е. имеется бесконечно малая вероятность появления бесконечно большого X . Следовательно, необходимо было решить вопрос о максимально возможном при некоторых условиях диаметре капли. Исследованиями [4] установлено, что максимально возможный диаметр капли примерно в 2,2 раза больше ММД. Это ограничение принято нами при проведении экспериментов.

Основная часть

При исследованиях монодисперсного распыла густота покрытия в каждом опыте легко рассчитывается:

$$\lambda = 6 \cdot 10^7 \frac{Q}{\pi d^3}, \quad (2)$$

где λ – густота покрытия, шт./см², Q – норма внесения, л/га, d – диаметр капли, мкм.

В таблице. 1 приведены расчетные значения нормы внесения, при которых будет достигнута заданная густота покрытия. Из нее видно, что 1 каплю/см² можно получить во всем спектре размеров капель УМО-диапазона норм внесения. Однако для применения почвенных гербицидов, требующих минимум 10 шт./см², можно использовать распыл с диаметром капель не более 360 мкм, системных гербицидов и инсектицидов (минимум 30 шт./см²) – 250 мкм, фунгицидов и контактных препаратов (минимум 70 шт./см²) – 190 мкм.

Таблица 1. Нормы внесения (л/га), при которых будет достигнута заданная густота покрытия λ

λ , Шт./с м ²	Диаметр капель, мкм					
	100	200	300	400	500	600
1	0,1	0,4	1,4	3,4	6,5	11,3
10	0,5	4,2	14,1	33,5	65,4	113,1
30	1,6	12,6	42,4	100,5	196,3	339,3
70	3,7	29,3	99,0	234,6	458,1	791,7

Однако оценивать качество обработки посевов только густотой покрытия недостаточно. Необходимо рассмотреть получаемую степень покрытия, определив вначале статистический закон ее распределения, а затем его числовые характеристики.

Анализ полигонов частот степени покрытия (рис. 1) и их оценка по критерию χ^2 показали, что мы имеем дело с нормальным распределением, которое характеризуется математическим ожиданием случайной величины и стандартным отклонением (дисперсией). Разброс значений степени покрытия вызван наложением следов капель друг на друга.

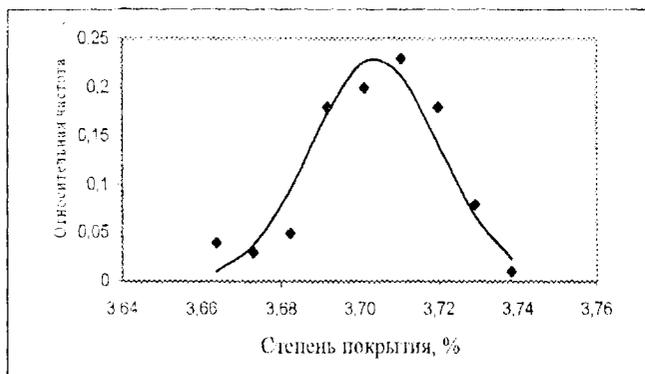


Рис. 1. Полигон частот степени покрытия при норме внесения 25 л/га и диаметре капель 100 мкм

С помощью метода наименьших квадратов и регрессионного анализа была получена формула для расчета средней степени покрытия горизонтальной поверхности монодисперсным аэрозолем:

$$U_{cp} = 0,149Q/d. \quad (3)$$

Таким образом, степень покрытия уменьшается с ростом диаметра капель. Задавшись уровнем критической степени покрытия 1, 3, или 5 % при максимальной норме внесения для УМО-диапазона — 25 л/га, можно определить диаметр капель, который не должен быть превышен — 370, 120 и 75 мкм соответственно (рис. 2).

Линия 25 л/га на рис. 2 показывает верхнюю границу УМО-диапазона.

Разброс значений степени покрытия, характеризуемый коэффициентом вариации, в каждой серии опытов незначителен. Значение этого показателя не превышало 5 % в пределах всего изучен-

ного факторного пространства, причем при увеличении нормы внесения и уменьшении диаметра используемых капель коэффициент вариации снижался. Учитывая незначительность флуктуаций изучаемой случайной величины, мы рекомендуем использовать формулу (3) для подбора технологических параметров процесса опрыскивания и выбора распылителей.

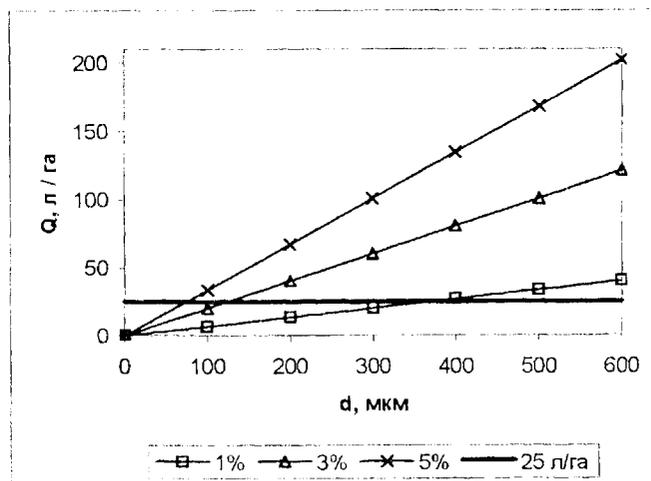


Рис. 2. Зависимость нормы внесения Q от диаметра d капель для различного уровня критической степени покрытия U_{cp}

Перекрытие следов капель на обработанной поверхности можно расценивать как негативный эффект, приводящий к нерациональному использованию пестицида, в особенности препаратов контактного действия. При значительных нормах внесения и неправильно подобранных параметрах работы опрыскивателя капли малых размеров могут сливаться в более крупные, которые плохо удерживаются на поверхности растения. Основная масса действующего вещества пестицида перемещается в жидкостной «валик», располагающийся по периметру листа, где проникновение в растение значительно затруднено. При монодисперсном УМО-опрыскивании в исследованном факторном пространстве относительная площадь поверхности, покрытая двумя и более каплями, не превысила 0,1 %, что необходимо отнести к существенным достоинствам этого метода обработки.

Анализ результатов исследований показывает, что технология УМО при монодисперсном распыле может быть использована только для почвенных и системных гербицидов, поскольку получить приемлемую степень покрытия объектов обработки другими видами препаратов современными техническими средствами крайне проблематично. Например, невозможно создать монодисперсный распыл с диаметром капель не более 75 мкм и обеспечить в полевых условиях приемлемую степень покрытия, поскольку капли такого размера легко сносятся ветром и быстро испаряются.

Получить монодисперсный распыл жидкости современными распылителями для сельскохозяй-

ственных опрыскивателей невозможно. Поэтому более важной, практически применимой и значительно более сложной задачей является определение степени покрытия объекта обработки полидисперсным распылом.

Густота покрытия при логарифмически нормальном распределении размеров капель является так же случайной величиной, распределенной по логарифмически нормальному закону (рис. 3). Проверка этой гипотезы осуществлялась по критерию χ^2 и подтвердилась. Для логарифмически нормального закона математическое ожидание случайной величины не имеет практического значения.

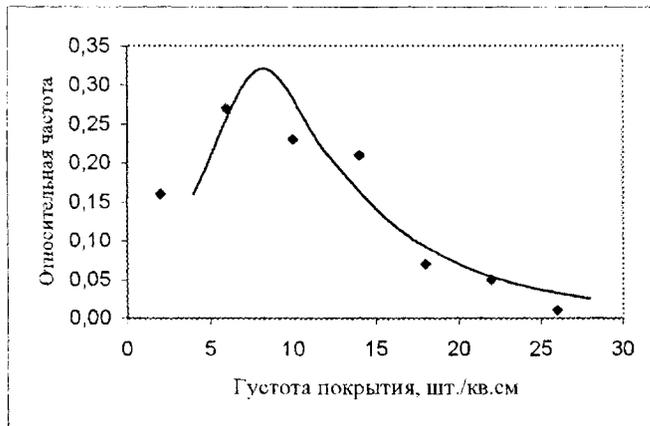


Рис. 3. Полигон частот густоты покрытия при норме внесения 1 л/га, диаметре капель 300 мкм и коэффициенте полидисперсности $K_n = 4$

Более информативным параметром является медиана распределения. Например, зная медиану распределения густоты покрытия λ_m , мы можем сказать, что в 50 % случаев густота покрытия будет больше λ_m , а в остальных 50 % случаев – меньше λ_m .

Плотность распределения густоты покрытия λ можно описать [5] формулой:

$$f(\lambda) = \frac{1}{\lambda \cdot b_\lambda \sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(\ln \lambda - a_\lambda)^2}{2b_\lambda^2}\right], \quad (4)$$

где a_λ и b_λ – среднееарифметическое значение и стандартное отклонение величины $Y = \ln(\lambda)$.

Определив значения параметров a и b формулы (4), можно получить функцию распределения густоты покрытия. Используя процедуры регрессионного анализа, получили следующие формулы:

$$a_\lambda = \ln\left(\frac{2 \cdot 10^7 K_n Q}{d_m^3}\right), \quad (5)$$

$$b_\lambda = 3 \cdot 10^{-4} \sqrt{K_n d_m^3 / Q}. \quad (6)$$

где d_m – ММД капель, мкм.

Медиана распределения густоты покрытия λ_m определяется по формуле:

$$\lambda_m = \exp(a_\lambda). \quad (7)$$

Используя (5) и (7) и задавшись характеристиками распылителей, можно построить график (рис. 4), показывающий медианную густоту покрытия поверхности обработки при различных значениях нормы внесения рабочей жидкости.

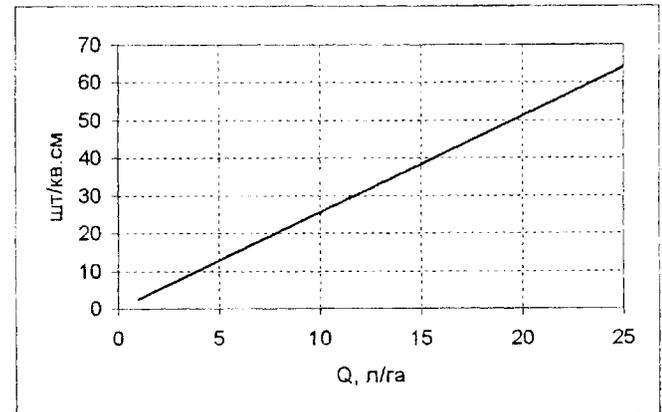


Рис. 4. Зависимость медианы густоты покрытия от нормы внесения для распыла с параметрами ММД = 250 мкм и $K_n = 2$

Для примера рассмотрим решение следующей задачи:

определить вероятность получения густоты покрытия более 30 шт./см² при ММД = 250 мкм, $K_n = 2$ и норме внесения рабочей жидкости $Q = 8$ л/га.

Определяем по (5) и (6) параметры распределения: $a_\lambda = 3$ и $b_\lambda = 0,593$. Подставляя найденные значения в (4) и интегрируя по λ на отрезке $[0, 30]$, получаем вероятность 0,74. Это означает, что в 74 % случаев количество капель на 1 см² не превысит 30 штук. Соответственно вероятность получения густоты покрытия более $\lambda = 30$ составит 26 %. Этот же результат можно получить, воспользовавшись функцией ЭТ «Excel»

$$\text{ЛОГНОРМРАСП}(30;3;0,593) = 0,74.$$

Исследования степени покрытия поверхности обработки при использовании полидисперсного распыла показали, что она распределена по нормальному закону. Это противоречит очевидному теоретическому обоснованию, определяющему один и тот же логарифмически нормальный закон для случайных величин X и $Y = X^2$. Однако при проведении экспериментов мы не обнаружили значительной асимметрии в полигонах частот и посчитали возможным использовать нормальное распределение в дальнейших расчетах.

Эта возможность была подтверждена проверкой по критерию χ^2 .

Средняя степень покрытия (математическое ожидание) рассчитывается по формуле:

$$u_{cp} = 0,1557Q/d_m. \quad (8)$$

В опытах не удалось обнаружить значимое влияние коэффициента полидисперсности K_n на u_{cp} .

Зависимость $Q = f(d_m)$, приведенная на рис. 5, показывает реальные границы УМО-внесения пестицидов для различных значений степени покрытия.

Из графика видно, что обычные щелевые гидравлические распылители, используемые на современных опрыскивателях и обеспечивающие распыл с ММД = 200...300 мкм, могут быть использованы только для применения почвенных и системных гербицидов. Распылители, образующие капли с ММД > 400 мкм, не рекомендуется использовать в УМО-диапазоне норм внесения рабочей жидкости.

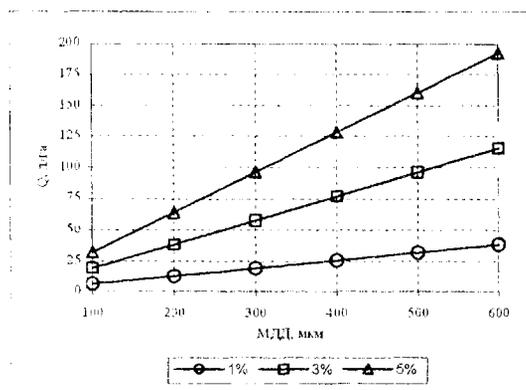


Рис. 5. К вопросу определения технологических параметров опрыскивания (Q , d_m) для достижения различных уровней критической степени покрытия

Стандартное отклонение:

$$\sigma_u = 10^{-5} Q \cdot (0,0083K_n d_m + 5). \quad (9)$$

В отличие от монодисперсного УМО-внесения пестицидов разброс значений степени покрытия при полидисперсном распыле оказался значительно выше. Коэффициент вариации достигает 28 %, увеличиваясь с ростом K_n .

Плотность распределения степени покрытия U можно описать формулой [5]:

$$f(U) = \frac{1}{\sigma_u \sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{(u - u_{cp})^2}{2\sigma_u^2} \right] \quad (10)$$

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Колмогоров А.Н. О логарифмически нормальном законе распределения частиц при дроблении // Докл. АН СССР. – 1949. – Т.16. – № 5. – С. 56.
- Клочков А.В., Маркевич А.Е. Дисперсность дробления жидкости различными типами распылителей // Эксплуатация, ремонт и восстановление с.х. техники: Докл. междунар. научн.-практ. конф., посвящ. 50-летию ф-та механизации сел. хоз-ва. – Горки, 1997. – С. 70.
- Дунский В.Ф., Никитин Н.В., Соколов М.С. Пестицидные аэрозоли. – М.: Наука, 1982. – 288 с.
- Техника и технология безопасного применения средств защиты растений: Лекции курсов обучения по контролю за качеством применения пестицидов / Госагропром СССР, Ciba-Geigy (Швейцария); 1987/88. – 215 с.
- Митков А.Л., Кардашевский С.В. Статистические методы в сельхозмашиностроении. – М.: Машиностроение, 1978. – 360 с.

Подставив в (10) значения u_{cp} и σ_u , рассчитанные на основании заданных технологических параметров опрыскивания, можно определить вероятность получения необходимой степени покрытия.

Например, для распыла с параметрами ММД = 250 мкм, $K_n = 3$ и нормы внесения рабочей жидкости $Q = 12$ л/га необходимо определить вероятность получения степени покрытия не менее 1 %.

Интегрируя (10) по U на отрезке (0–0,1) получаем вероятность 0,97. Иными словами, достигнуть степени покрытия 1 % и более при заданной норме внесения и параметрах распыла возможно только в 3 % случаев, т.е. событие считаем практически невозможным.

Для определения относительной площади U_2 поверхности, покрытой двумя и более каплями, получили формулу:

$$U_2 = 0,0115Q^2/d_m^2. \quad (11)$$

Используя (11), можно оценить потери пестицида из-за неэффективного распределения по поверхности обработки. Значение U_2 оказалось меньше, чем при монодисперсном распыле, и не превысило 0,07 %.

Заключение

Результаты моделирования процесса опрыскивания растений рабочей жидкостью пестицида и использование метода статистических испытаний позволили получить методики расчета технологических параметров опрыскивателей исходя из необходимости получения заданной степени покрытия растений. Методики распространяются на ультромалообъемное опрыскивание моно- и полидисперсными аэрозолями.

Анализ результатов исследований позволяет сделать вывод о том, что УМО-технология не должна использоваться для применения фунгицидов и контактных препаратов, более требовательных к качеству покрытия поверхности. Для применения почвенных и системных гербицидов можно использовать распылители, образующие капли с медианно-массовым диаметром не более 400 мкм.

Полученные результаты не учитывают существующие в полевых условиях негативные факторы, такие как испарение и снос капель ветром, неравномерность распределения жидкости по ширине захвата опрыскивателя и в направлении движения и др. Поэтому к применению технологии УМО необходимо подходить очень ответственно, взвесив все «за» и «против», во избежание существенных экономических потерь от неэффективного применения пестицидов.