

## Микробиологические аспекты многолетнего систематического применения гербицидов в земледелии

*Ю.В. Круглов, д.б.н., профессор, ФГБНУ ВНИИСХМ*

В условиях современного сельского хозяйства применение гербицидов является важным элементом агротехнологии возделывания сельскохозяйственных культур. Преимущества этого приёма для борьбы с сорной растительностью с точки зрения производительности труда и экономики сельскохозяйственного производства не вызывают сомнения. Вместе с тем неоднократно высказывались опасения относительно отрицательных последствий их широкого применения для здоровья человека и животных, а также экологии наземных и водных экосистем. Дискуссия на эту тему продолжается на протяжении нескольких десятилетий. По нашему мнению, некоторые вопросы, касающиеся влияния гербицидов на микрофлору и биохимические процессы в почве, обуславливающие её продуктивность и фитосанитарное состояние, актуальны и требуют обсуждения.

Несмотря на значительное количество работ в указанной области, особенно обильное во второй половине прошлого века, нет достаточно чёткого понимания механизма действия и опасности последствий применения гербицидов в сельском хозяйстве. Большинство микробиологов отмечают отрицательный эффект влияния гербицидов на отдельные физиологические группы микроорганизмов, целлюлозоразлагающую активность, нитрификационную способность и дыхание почвы, а также активность ряда ферментов. В качестве первопричины отрицательного эффекта рассматривается их токсичность. Многолетние исследования ВНИИСХМ показали, что отрицательный эффект зависит от концентрации гербицида [1]. Исходя из

этого, для оценки прямого токсического действия гербицидов на отдельные показатели почвенной биоты нами предложен коэффициент безопасности, который рассчитывается по отношению концентрации гербицида, снижающей численность микроорганизмов и биохимических процессов на 50% (ИК50), к производственным концентрациям (ПК) гербицида, вносимого в почву (ИК50/ПК). В строго контролируемых условиях лабораторных опытов установлено, что в большинстве случаев отрицательный эффект гербицидов проявляется при концентрациях, существенно превышающих производственные, т.е. коэффициент их безопасности выше единицы. Хотя нередко встречаются исключения. Чувствительные к гербицидам микроорганизмы, коэффициент безопасности которых ниже единицы, являются своего рода экологическими мишенями, на основании поведения которых можно судить об экологической безопасности применения гербицидов в производстве. Ряд авторов для оценки токсичности гербицидов вводит временной фактор, считая, что отрицательный эффект является значимым, если он удерживается не менее месяца [7]. Например, для гербицидов производных сим-триазинов, фенилмочевины, фенилкарбаматов такими экологическими мишенями являются фотосинтезирующие микроорганизмы (цианобактерии и микроскопические водоросли) [1].

В свете вышеизложенного важно рассмотреть влияние длительного многократного систематического применения гербицидов на микробиологические процессы, что, собственно, происходит на практике.

Наиболее наглядно это видно на примере микроскопических водорослей. Показано, что сим-триазины и фенилмочевины, являясь ингибиторами

фотосинтеза, подавляют рост и развитие микроскопических водорослей [1]. Производственные дозы этих гербицидов снижают их численность в почве во много раз. Однако через год количество водорослей выравнивается с контрольным вариантом опыта. При повторных обработках почвы этими гербицидами наблюдается та же закономерность, но восстановление происходит не полностью. Таким образом, при многолетнем применении гербицидов мы фактически блокируем жизнедеятельность альгофлоры, которая является важным компонентом почвенного микробиома. При этом в структуре комплекса фотосинтезирующих микроорганизмов происходят существенные изменения: практически полностью выбиваются азотфиксирующие цианобактерии и увеличивается относительная численность диатомовых и жёлтых водорослей.

Карботион, рекомендуемый в 1960-е гг. для борьбы с сорняками и фитопатогенными грибами, в производственных дозах блокирует процесс окисления аммиака до нитратов, что вызывает накопление в почве аммонийного азота и нитритов, оказывая таким образом влияние на характер минерального питания растений. С другой стороны, как фунгицид он подавляет развитие микромицетов, что соответственно приводит к серьёзной перестройке структуры микробного комплекса в почве, подавлению эндомикоризного симбиоза сельскохозяйственных растений. При многократном применении отрицательный эффект гербицидов на микроорганизмы-мишени возрастает. Тем не менее со временем микробный комплекс почвы в той или иной степени в функциональном плане адаптируется к гербицидам за счёт перестройки таксономической структуры и компенсационного механизма, присущего почвенному микробиому. При этом снижается индекс обилия и разнообразия микроорганизмов за счёт снижения численности или утери некоторых видов, представляющих экологические мишени.

Применение сим-триазинов и фенилмочевин, а также других ингибиторов фотосинтеза на посевах сои и других бобовых культур приводит к снижению уровня фотосинтеза растений. Это вызывает снижение эффективности формирования клубеньков на корнях и соответственно снижение активности фиксации молекулярного азота и продуктивности бобовых культур. Отрицательный эффект гербицидов на бобово-ризобиальный симбиоз можно частично купировать азотными удобрениями. Однако это снизит ценность бобовых культур как накопителей азота и повышает себестоимость продукции. Для повышения эффективности применения гербицидов в борьбе с сорной растительностью на посевах сои созданы ГМО-сорты, резистентные к высоким концентрациям гербицида. Это позволило увеличить дозы его применения в разы. Соответственно возросла эффективность борьбы с сорняками, увеличился урожай бобов благодаря дополнительному использованию минеральных

азотных удобрений. При этом снижается эффективность бобово-ризобиального симбиоза. По оценке специалистов, соя в зависимости от условий за вегетационный период фиксирует до 375 кг (в среднем 50–60 кг) молекулярного азота с гектара и в значительной степени способна обеспечить свои потребности в азотном питании за счёт атмосферного азота [8]. Более того, при помощи корней и пожнивных остатков, особенно в условиях беспашотного земледелия, соя существенно пополняет азотный фонд почвы. Другая сторона вопроса – высокие концентрации и соответственно возрастающий вынос гербицидов с осадками и грунтовыми водами в водоёмы многократно повышает их опасность для гидробионтов, которые составляют кормовую базу рыбы. Отсюда будет понятна агрономическая и экологическая оценка многолетнего использования таких гербицидов на посевах бобовых культур.

Таким образом, результаты исследований позволяют сделать заключение, что прямое токсическое действие гербицидов на микрофлору почвы носит избирательный характер. Гербициды блокируют жизнедеятельность чувствительных к ним групп микроорганизмов, называемых экологическими мишенями. Дальнейшее развитие событий в почве, как правило, зависит от места и роли этих микроорганизмов-мишеней в функциональной структуре микробиома. Длительное многократное применение гербицидов усиливает давление на микроорганизмы-мишени, вследствие чего наблюдается перестройка микробного комплекса, что обуславливает полное или частичное восстановление его функции за счёт устойчивых к гербицидам видов. При этом чувствительные к гербицидам виды надолго выпадают из почвенного микробиома, происходит снижение его разнообразия.

Сложность и неоднозначность последствий длительного применения гербицидов в полевых условиях для микробиома почвы связаны как с разнообразием химических соединений, используемых в земледелии, так и с многообразием условий и агротехники возделывания сельскохозяйственных культур. С применением гербицидов существенно снизилась роль механических обработок почвы как приёма борьбы с сорняками. Появились различные варианты так называемых минимальных обработок и беспашотного земледелия, в которых для борьбы с сорной растительностью эффективно используются гербициды. Вместе с тем хорошо известно, что механическая обработка обуславливает водно-воздушный режим почвы и распределение растительных остатков. Стерня и растительная масса сорняков, заделываемых в почву при механической обработке, иногда соизмерима с биомассой основной культуры, убираемой с поля.

В гербицидном варианте масса отрастающих сорняков намного меньше, чем в контрольном варианте. Эти изменения, как правило, выпада-

ют из поля зрения исследователей, изучающих последствия применения гербицидов. Между тем они играют существенную роль в формировании таксономической и функциональной структуры микробного комплекса, а также интенсивности биохимических процессов почвы. В этом плане представляют интерес сравнительные исследования биологической активности почвы так называемого химического пара и традиционных способов содержания пара с использованием механической обработки почвы (плоскорез по Бараеву и вспашка с отвалом), проведённые нами совместно со специалистами Степноишимской опытной станции эрозии почв (Казахстан) [2]. Показано, что обработка гербицидами парового клина (химический пар) достоверно снижает биогенность, целлюлозоразлагающую активность и нитрифицирующую способность почвы. Это обусловлено не ингибирующим эффектом гербицидов, а характером распределения в почве пожнивных остатков и отрастающих в поле сорняков. Если при механической обработке стерня и отрастающие сорняки, масса которых за период парования составляла 400–600 г/м<sup>2</sup>, заделывалась в почву и разлагалась там микроорганизмами, то в условиях химического пара она была в 6 раз меньше, оставалась на поверхности и высыхала.

В наших опытах с многолетним лекарственным растением диоскореей кавказской (*Dioscorea caucasica*) спустя три года после ежегодной обработки почвы гербицидами – Атразином и Монуруном снизилась общая биогенность почвы, целлюлозоразлагающая активность и нитрификационная способность, а также активность ферментов каталазы, инвертазы, протеазы [3]. Масса заделываемых в почву сорняков при междурядной обработке культиватором в контрольном варианте составляла ежегодно в среднем 500 г/м<sup>2</sup>, или около 1500 г за три года, при обработке гербицидами – 7–13 г, т.е. более, чем на один порядок ниже. Разница в количестве энергетического материала и питательных веществ, поступающих в почву с сорняками, предопределила разницу в биологической активности. Аналогичные результаты получены при ежегодном многолетнем использовании Симазина и Атразина в посадках ели (*Picea abies* (L.) Karst) [1]. Здесь в контрольном варианте опыта биомасса травостоя в междурядьях составляла в разные годы от 700 до 1100 г/м<sup>2</sup>, в гербицидном – 70–80 г. Причём в последнем случае растения располагались неравномерно и в основном были представлены мхами. Вследствие 9-летнего применения гербицидов численность сапротрофных бактерий по сравнению с контролем снизилась в 1,5–3,0 раза, целлюлозоразлагающих микроорганизмов – на один порядок, нитрификаторов – в 2–5 раз, содержание органического углерода в междурядьях было меньше, чем в контрольном варианте, на 15%, на гребне – почти в 2 раза. Такие же результаты получены при ежегодном пятилетнем применении

комплекса гербицидов, включающего Монурун, Симазин, Атразин, 2,4-Д и Реглон, на плантациях мандарина (*Citrus reticulata*). При этом необходимо отметить что в контрольном варианте опыта при механической обработке почвы биомасса сорняков, заделываемых в почву, составляла ежегодно в среднем около 1,0 кг/м<sup>2</sup>, в гербицидном варианте на один порядок ниже. Соответственно за 5 лет содержание гумуса в гербицидном варианте снизилось на 10–18%, валового азота – на 25–30%.

В опытах Ю.Я. Спиридонова с соавторами за 9 лет было внесено 52 л гербицида Раундап на 1 га [4]. В результате в почве произошло снижение численности сапрофитной микрофлоры. Биомасса сорной растительности в варианте с гербицидами была ниже контрольного значения в 5 раз. Таким образом, во всех исследованиях выявлено, что взаимосвязь между биомассой растений и биологической активностью является очевидной.

Приведённые примеры показывают, что крупные и длительные изменения в биологической активности почвы связаны не только и не столько с микробицидным действием гербицидов на почвенную микробиоту, сколько с изменением технологии механической обработки почвы, объёмом и характером распределения растительных остатков, т.е. отрицательный эффект гербицидов на микробиологические процессы носит опосредованный характер. Пожнивные остатки и отрастающие в поле сорняки являются основным энергетическим материалом и источником питания для жизнедеятельности почвенных микроорганизмов. Признание этого тезиса приводит к заключению, что, используя гербициды для борьбы с сорняками, необходимо тщательно взвесить положительные и отрицательные стороны минимизации механической обработки почвы для её плодородия. В одних случаях она полезна, в других – наоборот.

В свете сказанного представляет интерес остановиться на технологии так называемой нулевой обработки почвы (беспашотное земледелие, или No-till технологии), которая широко пропагандируется последние десятилетия. В странах – наиболее крупных производителях сельскохозяйственной продукции, таких, как Канада, Аргентина и Бразилия, различные варианты технологии No-till занимают более 50%, в США – более 20% обрабатываемой площади [9]. Эти технологии в значительной степени решают проблемы воспроизводства органического вещества в почве, а также борьбы с водной и ветровой эрозией. Основная особенность технологии No-till заключается в почти полном отказе от механической обработки почвы. Из технологического цикла исключается пар. Для борьбы с сорняками используются гербициды. Растительные остатки после уборки урожая остаются на поверхности почвы. Применение такой технологии приводит к серьёзным изменениям физико-химических и соответственно биологических свойств почвы [5].

Накопленный за несколько десятилетий материал сравнительных исследований биологической активности почвы в условиях традиционной системы механической обработки и беспашотного земледелия имеет противоречивый характер. Одни авторы отмечали, что под влиянием No-till технологии происходит увеличение численности и биомассы микроорганизмов, возрастает выделение  $\text{CO}_2$ , а также эмиссия  $\text{N}_2\text{O}$ ,  $\text{NO}$  и молекулярного азота в результате микробиологических процессов денитрификации. Другие, наоборот, наблюдали снижение биологической активности, уменьшение биоразнообразия почвенного микробиома. Третьи не видели принципиальной разницы биологической активности в условиях традиционной обработки почвы и технологии No-till [8, 10, 11]. Причина этих противоречий, по нашему мнению, заключается в том, что при беспашотном земледелии огромная масса послеуборочных растительных остатков образует достаточно толстый мульчирующий слой, обуславливающий изменение температуры и влажности почвы. В отсутствие механического рыхления возрастает дифференциация почвенного профиля. Причём в зависимости от климата, конкретных метеорологических условий, типа почвы и культуры растений влияние этих факторов на микробиоту носит неодинаковый характер. Если в условиях жаркого сухостепного климата при ограниченном количестве осадков мульчирующий слой соломы обеспечивает влагосбережение и снижает температуру почвы, оптимизируя жизнедеятельность микроорганизмов, то во влажном климате наблюдается обратная картина. При избыточном количестве осадков создаются анаэробные условия в верхнем, наиболее продуктивном слое, вследствие чего происходят соответствующие изменения в функциональной структуре микробного комплекса, возрастает эффективность процессов денитрификации, обуславливающих выброс молекулярного азота и парниковых газов в виде газообразных окислов [11], а также развитие анаэробных бактерий-продуцентов масляной кислоты и высших спиртов, токсичных для растений. С другой стороны, в условиях беспашотного земледелия при наличии значительного слоя растительных остатков на поверхности почвы создаются благоприятные условия для развития фитопатогенных микроорганизмов, прежде всего микроскопических грибов и соответственно возрастает опасность распространения инфекционных заболеваний растений. Для предупреждения этих заболеваний появляется необходимость проводить дополнительные мероприятия по защите растений. Отсюда возникает соблазн использовать фунгициды с вытекающими из этого последствиями. Фунгициды являются ингибиторами микроскопических грибов и дрожжеподобных микроорганизмов, а также оказывают отрицательное влияние на формирование эндомикоризы сельскохозяйственных культур.

Беспашотное земледелие подразумевает непрерывное использование гербицидов для борьбы с сорной растительностью. Однако в настоящее время практически отсутствуют исследования, вычленяющие влияние их на почвенно-микробиологические процессы в этих условиях. По-видимому, не случайно. С одной стороны, беспашотное земледелие без гербицидов не имеет перспектив. С другой – роль растительных остатков и механической обработки почвы, как показано выше, имеет неизмеримо большее значение для формирования и функционирования почвенной биоты, чем гербициды.

Таким образом, нельзя не согласиться с В.И. Кирюшиным, что при экологизации земледелия, особенно в долгосрочном плане, «для принятия оптимальных решений необходимо прежде всего представлять функции почвообработки» [6], поскольку характер механической обработки почвы предопределяет не только характер распределения послеуборочных остатков, изменение водно-воздушного режима и физико-химические свойства почвы, но и соответственно с этим структуру и функциональное состояние микробиома почвы на многие годы.

Многолетнее применение гербицидов оказывает как прямое, так и опосредованное влияние на микрофлору почвы. Изменения технологии подготовки и содержания почвы, которые происходят в связи с использованием гербицидов, приводят к более глубоким и радикальным изменениям физико-химических и соответственно биологических свойств почвы, что необходимо учитывать при агроэкологической оценке и принятии решений в адаптивно-ландшафтном земледелии.

### Литература

1. Круглов Ю.В. Микрофлора почвы и пестициды. М.: Агропромиздат. 1991. 129 с.
2. Круглов Ю.В. Изменение микробиологических показателей в почве при различных способах содержания пара / Ю.В. Круглов, А.Н. Перцева, Н.А. Соснин, Г.С. Васильковская // Почвоведение. 1979. № 8. С. 82–87.
3. Круглов Ю.В., Перцева А.Н., Галкина Г.А. Изменение биологической активности почвы под влиянием многолетней систематической обработки гербицидами // Доклады ВАСХНИЛ. 1975. № 2. С. 20–21.
4. Спиридонов Ю.Я. Многолетнее применение общеистребительного гербицида раундап в центральном районе нечерноземья / Ю.Я. Спиридонов, Г.Е. Ларина, Л.Д. Протасова, В.А. Абубикеров, М.Г. Жариков // Агрохимия. 2010. № 2. С. 29–36.
5. NO-TILL – шаг к идеальному земледелию / Под ред. В. Багурина. М.: Народное образование, 2006. 119 с.
6. Кирюшин В.И. Экологизация земледелия и технологическая политика. М.: Изд-во МСХА, 2000. 473 с.
7. Domsch K., Jagnov G., Anderson H. An ecological concept for the assessment of side-effects of agrochemicals on soil microorganisms // Residue Review. V. 86. PP. 65–105.
8. Salvagiotti F., Cassman K.G., Specht J.E., Walters D.T., Weiss A., Dobermann A. Nitrogen uptake, fixation, and response to fertilizer N in soybeans: A review // Field and Crops Research. 2008. V. 108. PP. 1–13.
9. Система нулевой обработки почвы [Электронный ресурс]. URL: <http://Wikipedia.org/wiki/>.
10. Rice W., Smith M. Denitrification in No-Till and Plowed Soils // Soil Science Society of America Journal. 1982. V.46. № 6. PP. 1168–1173.
11. Soane B., Ball B., Arvidsson J., Basch G., Moreno F., Roger-Estrade J. No-till in northern, western and south western Europe: A review of problems and opportunities for crop production and the environment // Soil and Tillage Research. 2012. V. 118. P. 66–87.