

ТРАНСПОРТ И МЕТАБОЛИЗМ ХЛОРСУЛЬФУРОНА В РАСТЕНИЯХ ПРИ ЕГО ПОСТУПЛЕНИИ ЧЕРЕЗ ЛИСТЬЯ

В. К. КУКУШКИН, А. Д. ФОКИН, В. В. РАЧИНСКИЙ, К. Ш. ИБРАГИМОВ,
В. Ф. ЛАДОНИН, Л. Н. САМОЙЛОВ, С. Н. ГОЛОСОВ, В. И. СОРОКИН

(Кафедра применения изотопов и радиации в сельском хозяйстве)

Изучаются транспорт и метаболизм ^{14}C -хлорсульфурина в чувствительных и устойчивых к препарату культурах. Дается оценка процессам переноса хлорсульфурина в почву из надземной массы и консервации его в активной форме в растительных остатках и их последствий (повышенная фитотоксичность остаточных форм данного гербицида в агроэкосистемах).

Качественный состав остаточных форм пестицидов и их накопление в почве существенно зависят не только от процессов трансформации и перемещения препаратов, поступивших в почву, но и от масштабов и форм «вторичного» поступления с растительными остатками и корневыми выделениями. Это прежде всего относится к препаратам, которыми обрабатывают растения в период вегетации, поскольку в данном случае значительная часть вещества может поступать в них через надземные органы, минуя почву.

Хлорсульфурон представляет собой гербицид двустороннего

действия, он поступает в растения из почвы через корни и посредством прямого поглощения вещества листовой поверхностью. Этим отчасти обусловлена возможность существенного варьирования сроков внесения препарата, особенно при обработке посевов пшеницы [2].

В связи с особенностями технологии применения остаточное действие хлорсульфурина будет определяться не только процессами превращения и консервации гербицида, поступившего непосредственно в почву, но и процессами превращения исходного препарата в растительных остатках с последующим осво-

бождением при разложении последних, а также выделениями гербицида и продуктов его трансформации во внешнюю среду из корневой системы при базипетальном транспорте веществ.

В настоящей работе представлены результаты изотопно-индикаторных исследований транспорта и метаболизма хлорсульфурана, поступившего в растения только через листовую поверхность, на основании которых дается оценка возможного остаточного действия поглощенного растениями гербицида при его последующем поступлении в почву.

Литературные сведения о поглощении хлорсульфурана надземными органами растений, последующих процессах трансформации и перемещения по растению весьма разнообразны. В частности, отмечается, что при обработке листьев на поверхности растений может оставаться от 20 до 98 % гербицида [4, 5, 7, 8]. В одних случаях большая часть хлорсульфурана (60—90 %) остается в тканях обработанного листа [4, 8]. Указывается также, что до 80 % гербицида перемещается в другие органы растений [5], при этом преобладает акропетальный транспорт вещества [7].

Устойчивые и чувствительные к хлорсульфурану виды растений различаются прежде всего по скорости метаболизма гербицида. Для устойчивых видов период полуразложения составляет 2—3 ч, для чувствительных он приблизительно на порядок выше [8]. Существенных различий в удерживаемости, по-

глощении и локализации хлорсульфурана при обработке чувствительных и нечувствительных культур не обнаружено [6].

Для получения более полных представлений о поведении хлорсульфурана в растениях при их надземной обработке необходимо продолжать систематические исследования с использованием разнообразных культур и сорных растений.

Наши исследования были проведены на яровой пшенице (мало чувствительная к хлорсульфурану культура), а также на кукурузе и горохе (чувствительные культуры). Наряду с изучением перераспределения по растению и трансформации хлорсульфурана, нанесенного на листья, в одном из вариантов опыта с чувствительными культурами исследовалась возможность выделения гербицида и продуктов его трансформации через корни кукурузы (растение-донор) и последующего поглощения выделенных меченых продуктов горохом (растение-индикаторы).

Все опыты проводили в условиях песчаных культур в сосудах объемом 5 л. Выращивали по 9 растений пшеницы и гороха в каждом сосуде и по 4 растения кукурузы и гороха.

Меченный ^{14}C хлорсульфуран (метка в 6-м положении триазинового кольца) наносили на один из листьев 15-дневных проростков. Объем пробы на 1 растение составлял 0,25 мкл с общей активностью 2×10^5 расп/мин. В раствор добавляли поверхностно-активное вещество (ТВИН).

Последующая вегетация ра-

стений протекала в условиях, исключающих смывание нанесенного препарата с поверхности листа и поступление его в питательный субстрат. В опытах, в которых изучали переход меченых продуктов из одних растений в другие, наземные органы растений разделяли полиэтиленовой пленкой с целью исключения возможности механического перераспределения меченого препарата между растениями.

Через 15 сут после нанесения препарата растения убирали вместе с корнями. За истекший период рост чувствительных культур полностью прекращался. Отмечались ярко выраженный хлороз и омертвление листьев. У пшеницы наблюдалось пожелтение только обработанного листа. Угнетение роста было также характерно для индикаторных растений гороха, выращиваемых совместно с кукурузой, на листья которой наносили хлорсульфурон.

Отобранные растения разделяли по органам: верхние листья, стебли и нижние листья, корни. Отдельно анализировали листья, на которые наносили меченый хлорсульфурон. Биомассу растирали в ступке с жидким азотом, после чего проводили вытесняющую экстракцию 90 % ацетоном. Из ацетонового экстракта отмывали гексаном цветные пигменты. Активность ацетонового экстракта измеряли на бетаспектрометре фирмы Фармация ЛКБ Валлак марки Ракбета 1219. После измерения абсолютной активности определяли содержание метаболитов и исходного вещества методом тонкослойной радиохроматографии.

Полученные аналитические данные представлены в табл. 1 и 2.

По суммарно-экстрагируемому количеству ^{14}C -хлорсульфурана культуры практически не различались (60—70 % нанесенной активности), соответст-

Т а б л и ц а 1

Распределение ^{14}C -хлорсульфурана по органам растений (числитель — % нанесенной активности, знаменатель — % суммарно-экстрагируемой активности)

Вид растения	Орган растений			
	Корни	Листья + стебли	Верхние листья	«Меченый» лист
Пшеница	2,3*	2,0	0,5	55,3
	3,8	3,3	0,9	92,0
Горох	1,8	1,5	8,3	56,7
	2,7	2,1	12,1	83,2
Кукуруза (донор)	6,1	13,4	1,8	38,5
	10,2	22,5	2,9	64,4
Горох (индикатор)	0,8	0,4	—	—
	1,3	0,7	—	—

* Относительные ошибки по повторностям не превышали 5 %.

венно 30—40 % приходилось на общие потери препарата из растений, предположительно часть потерь — на испарение и выделение $^{14}\text{CO}_2$, часть — на отрицательный транспорт из корневой системы во внешнюю среду. Соотношение данных потоков в цикле трансформации хлорсульфурана до настоящего времени не изучено.

У растений, устойчивых к действию препарата (пшеница), ^{14}C -хлорсульфурон равномерно распределялся между надземной массой и корнями (около 3—4 %). Однако основное его количество оставалось на месте нанесения (около 92 % экстрагированной активности). Кроме того, отмечался ослабленный транспорт в молодые листья. У чувствительных растений по сравнению с пшеницей перенос вещества из меченого листа в органы происходил гораздо активнее, причем у гороха более выражено акропетальное перемещение ^{14}C -хлорсуль-

фурана с относительным накоплением его в верхних листьях. Преобладание базипетального транспорта вещества характерно для кукурузы.

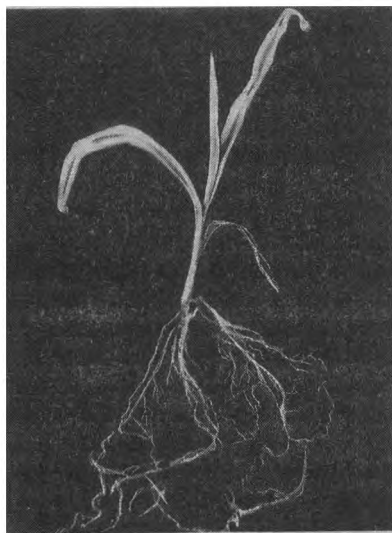
Представленный на рисунке радиоавтограф кукурузы хорошо иллюстрирует направление передвижения меченого препарата: нисходящий ток явно преобладает над перемещением вещества вверх. Наличие микрозон, соответствующих расположению корневых волосков, указывает на активное выделение ^{14}C -хлорсульфурана через корни.

Расположение меченого углерода в гетероцикле позволило методом тонкослойной радиохроматографии идентифицировать исходный препарат и его метаболиты в каждом из анализируемых органов растений (табл. 2). К идентифицированным метаболитам относятся гидроксиформы, которые, согласно литературным данным, включают в себя гидроксилированные производные хлор-

Таблица 2
Соотношение хлорсульфурана и его метаболитов в органах растений (% к сумме в органе)

Вид растения	Определяемое вещество	Корни	Листья + корни	Верхние листья	«Меченый» лист
Пшеница	Гидроксиформа	59,2*	72,4	12,9	79,7
	Триазин	14,7	9,7	42,9	18,5
	Хлорсульфурон	26,1	17,9	39,2	1,8
Горох	Гидроксиформа	32,5	68,4	73,9	81,5
	Триазин	26,7	20,6	13,7	10,2
	Хлорсульфурон	40,8	11,0	12,4	8,3
Кукуруза	Гидроксиформа	28,2	2,2	69,9	79,7
	Триазин	23,6	11,2	25,0	10,0
	Хлорсульфурон	48,3	86,6	5,1	10,3
Горох (индикатор)	Гидроксиформа	20,8	10,6		
	Триазин	34,3	47,8	—	—
	Хлорсульфурон	44,9	41,6		

* Относительная ошибка радиохроматографических анализов составляла ~20 %.



Радиоавтограф растения кукурузы.

сульфурана и его конъюгаты с глюкозой [8], а также триазин, образующийся при расщеплении сульфонилмочевинного мостика [3].

Процесс трансформации хлорсульфурана наиболее активно протекает непосредственно на месте его нанесения («меченый» лист): идут в основном процессы гидроксилирования хлорсульфурана (около 80 % гидроксиформ). Кроме того, низкое содержание хлорсульфурана на месте нанесения, возможно, объясняется высокой транспортабельностью вещества и его активным оттоком в другие органы. Соотношение определяемых веществ по другим органам растения сдвигается в сторону увеличения доли исходного препарата, что также указывает на преобладание транспорта именно неизменной формы хлорсульфурана.

Соотношение метаболитов и

исходного препарата в корнях и надземной биомассе пшеницы относительно равномерное, тогда как у чувствительных к хлорсульфурану культур (горох и кукуруза) заметны торможение трансформации гербицида в корневой системе (около 40—50 % исходного препарата к количеству ^{14}C -хлорсульфурана в корнях) и гидрокселирование его в верхних листьях.

На основе результатов радиохроматографического анализа проведен расчет количества исходного препарата в анализируемых растениях (табл. 3).

Наименьшее количество исходного препарата обнаружено в устойчивых растениях (около 2 %). Очевидно, что в течение вегетационного периода метаболизм хлорсульфурана у них будет продолжаться и остаточное количество исходного препарата будет небольшим. У чувствительных к препарату культур количество гербицида, не претерпевшего трансформации, было в 3—9 раз выше, чем у устойчивых видов: у гороха —

Таблица 3
Распределение неизменного хлорсульфурана по органам растений (% к сумме экстрагированной активности)

Вид растений	Органы растения			
	Корни	Лист+стб-ли	Верх-ние листья	«Меченый» лист
Пшеница	0,60	0,36	0,20	1,00
Горох	0,74	0,16	1,02	4,7
Кукуруза	2,95	11,63	0,09	4,0
Горох (индикатор)*	0,36	0,17	—	—

* Для растений-индикаторов количество исходного препарата дано в % к сумме экстрагированной активности ^{14}C растений-доноров (кукуруза) и растений-индикаторов.

6,6 %, кукурузы — 18,7 %. У чувствительных растений содержание хлорсульфурана в биомассе возрастает при прекращении нормальной жизнедеятельности растений. В результате замедляются и останавливаются биохимические процессы трансформации хлорсульфурана, что, в свою очередь, приводит к консервации исходного препарата в растительных остатках. Таким образом, при увеличении уровня засоренности полей можно ожидать повышенного накопления в растительных остатках остаточных форм хлорсульфурана, поступившего в почву. Нетрудно в первом приближении оценить, что если хлорсульфуран будет вести себя в сорном растении так же, как и в кукурузе, около 10 % препарата, попавшего на сорное растение, поступит в почву в составе растительных остатков.

Если учесть, что фитотоксичность гербицида в составе растительных остатков может оказаться выше, чем исходного препарата, как это обнаружено для симазина [2], то общее действие остаточных форм может оказаться выше ожидаемого, исходя из представлений о скорости исчезновения препарата из почвы.

По условиям опыта был предусмотрен вариант, в котором изучали перенос хлорсульфурана через корневую систему из растений-доноров (кукуруза) в растения-индикаторы (горох). Нами установлено, что в растения-индикаторы поступает около 2 % суммарно экстрагированной активности ^{14}C -хлорсульфурана растений-доноров.

За период наблюдения из корневой системы кукуруза может выделяться до 20—40 % поступившего на растение вещества. Таким образом, данный поток может играть существенную роль в формировании остаточных форм хлорсульфурана. Однако этот вопрос необходимо изучать в опытах с различными культурными и сорными растениями.

Полученные результаты также свидетельствуют о том, что значительная часть потерь препарата из биомассы кукурузы обусловлена активным переносом вещества во внешнюю среду через корневую систему.

По данным радиохроматографического анализа, в растениях, поглощавших гербицид из корневых выделений, соотношение хлорсульфурана и его метаболитов полностью соответствует соотношению их в корневой системе растений-доноров. Следовательно, транспорт ^{14}C -хлорсульфурана из корней меченых растений во внешнюю среду предположительно осуществляется в основном за счет нетрансформированного гербицида.

При изучении транспорта и метаболизма ^{14}C -хлорсульфурана, нанесенного на поверхность листа, установлена четкая дифференциация данных процессов в зависимости от устойчивости растения к препарату и от вида растения. У чувствительных культур наблюдаются более активный транспорт вещества, предположительно в виде исходного препарата, по органам растения и замедленная трансформация ^{14}C -хлорсульфурана, осо-

бенно в корневой системе. Это приводит к увеличению поступления хлорсульфурина в почву в составе растительных остатков при возрастании уровня засоренности агросистем.

После нанесения гербицида на листья кукурузы развивается активный транспорт ^{14}C -хлорсульфурина базипетального направления, что приводит к выделению из корневой системы вещества во внешнюю среду (20—40 % к количеству вещества, поступившего на растение).

Таким образом, на основании изложенного выше можно утверждать, что фитотоксичность остаточных форм гербицида обусловлена не только механическим попаданием препарата в почву, но и биологическими процессами, а именно активным переносом исходного препарата в почву из надземной массы через корневую систему и консервацией хлорсульфурина в активной

форме в отмерших органах чувствительных к препарату культур, особенно в корневых системах.

ЛИТЕРАТУРА

1. Рачинский В. В., Фокин А. Д., Кретьова Л. Г. и др. Поступление в растение симазина и 2,4-Д из растительных остатков.— Изв. ТСХА, 1984, вып. 1, с. 83—87.— 2. Техническое руководство по гербициду Глин/Дюпон.— Канада, 1985.— 3. Beyer E. M. et al.— *Herbicides Chemistry, Degradation and Mode of Action*, New York, 1987, vol. 3, p. 117—189.— 4. Devine M. D., Vanden Born W. H.— *Weed Sci.*, 1985, vol. 33, p. 524.— 5. Hageman L. H., Behrens R.— *Weed Sci.*, 1984, vol. 32, N 2.— p. 162.— 6. Müller F., Kang B. H., Maruska F. T.— *Med. Fac. Landbouwn Rijksuni Gent*, 1984, Bd. 49, N 36, S. 1091—1108.— 7. Peterson P. I., Swisher B. A.— *Weed Sci.*, 1985, vol. 33, N 1.— p. 7—11.— 8. Sweetser P. B., Schow G. L., Hutchison I. M.— *Pest. Biochem. Phys.*, 1982, vol. 17, N 1, p. 18—23.

Статья поступила 28 апреля 1989 г.