

УДК 573.6:633/635:539.16.04(476)

*А. Р. ЦЫГАНОВ<sup>1</sup>, Г. А. ЧЕРНУХА<sup>2</sup>*

**АГРОЭКОЛОГИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ПРИМЕНЕНИЯ НОВОГО  
ПОЛИФУНКЦИОНАЛЬНОГО ПОЛИМЕРА НА ЗАГРЯЗНЕННЫХ  
РАДИОНУКЛИДАМИ ЗЕМЛЯХ**

<sup>1</sup>*Президиум НАН Беларуси, Минск, Республика Беларусь*

<sup>2</sup>*Белорусская государственная сельскохозяйственная академия, Горки, Республика Беларусь,  
e-mail: go\_rki@mail.ru*

*(Поступила в редакцию 24.02.2012)*

В 50–60-х гг. XX столетия учеными-радиоэкологами под руководством В. М. Клечковского были выполнены фундаментальные исследования поведения искусственных радионуклидов в системе «почва – растение – человек». Итогом этих работ явилась разработка комплекса защитных мероприятий, обеспечивающих получение сельскохозяйственной продукции с минимальным содержанием радионуклидов. Так, было установлено, что важнейшим способом ограничения накопления радионуклидов в урожае сельскохозяйственных культур служит увеличение плодородия почвы, создание оптимального режима минерального питания растений и рациональное внесение удобрений [1]. До сих пор науке и практике не известны более эффективные методы снижения содержания техногенных радионуклидов в растениеводческой продукции [2–4].

Применение радиоэкологических контрмер на загрязненных в результате чернобыльской катастрофы землях позволило существенно снизить поступление в сельскохозяйственную продукцию таких радионуклидов, как цезий и стронций. Однако, несмотря на то что после аварии на ЧАЭС прошло более 26 лет, содержание радионуклидов в сельскохозяйственной продукции по-прежнему превышает доаварийный уровень. Это обуславливает дальнейший поиск новых, более эффективных как с радиологической, так и экономической точки зрения способов снижения поступления радионуклидов в растениеводческую продукцию [5].

Наряду с общепринятыми в агропромышленном производстве мероприятиями (внесение минеральных и органических удобрений, известкование, агротехнические приемы, подбор культур и сортов) изучали различные методы дезактивации, целью которых было уменьшение содержания техногенных радионуклидов в почве. Анализ литературных источников показал, что пока не существует эффективных методов дезактивации почв, позволяющих решить радиоэкологические проблемы в аграрной сфере [6, 7].

Главная проблема, с которой сталкивается сельхозпроизводитель на загрязненных радионуклидами территориях, заключается в том, что пока нет доступных методов, которые позволили бы прервать биологическую цепочку миграции радионуклидов в системе «почва – растение», в связи с этим комплекс общепринятых защитных мероприятий необходимо проводить ежегодно.

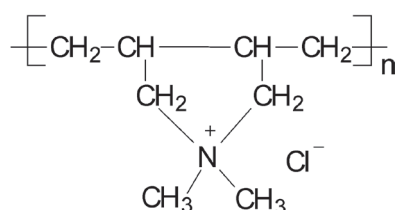
Поиск препаратов, позволяющих блокировать поступление радионуклидов из почвы в растения, ведется уже достаточно давно. Внесение в почву природных сорбентов, увеличивающих ее поглонительную способность и избирательно связывающих ионы цезия и стронция, ожидаемого эффекта не дало. В литературе имеются сообщения об использовании композиционных материалов для снижения поступления радионуклидов из почвы в растения, но до практического их применения дело не дошло [7–10].

Фундаментальные исследования последних лет позволили разработать концепцию создания нового класса полифункциональных олигомеров, содержащих заряженные атомы в каждом звене цепи или полиеновые «заряженные» блоки, а также функциональные, комплексообразующие

и другие группы. Эти полимеры, близкие по строению и структуре к природным системам, способны осуществлять электронный и ионный перенос в молекуле, а также комплексообразующие и окислительно-восстановительные процессы.

В рамках белорусско-российского проекта, финансируемого фондами фундаментальных исследований обоих государств, учеными Московской государственной академии тонкой химической технологии им. М. В. Ломоносова создан новый полифункциональный полимер для обработки почвы. Химическое название действующего вещества полимера – поли-N,N-диметил-3,4-диметиленпирролидиний хлорид. Он представляет собой белый гигроскопический порошок, хорошо растворимый в воде, метаноле и этаноле и нерастворимый в других органических растворителях. Это водорастворимый электропроводящий многофункциональный полимер, сочетающий в себе высокую поверхностную активность, комплексообразующую и флокулирующую способность, а также отличные биологические свойства в отношении микроорганизмов.

Полимер имеет линейную структуру с положительным зарядом на каждом звене молекулы и противоионом  $\text{Cl}^-$ :



Цель исследований – изучить влияние нового полифункционального полимера на урожайность сельскохозяйственных культур, структуру почвы и поведение цезия-137 и стронция-90 в системе «почва – растение».

**Материалы и методы исследований.** Для изучения агроэкологических свойств полимера в 2009 г. нами был заложен полевой опыт на территории радиоактивного загрязнения в УСПК «Краснопольский» Могилевской области. Схема опыта включала 8 вариантов, которые отличались дозами применения полимера на единицу массы почвы (табл. 1). Обработку почвы полимером производили однократно – при закладке опыта, с помощью ранцевого опрыскивателя после посева овса. В первый год исследования проводили с овсом (зерно), во второй – с горохо-овсяной смесью (зеленая масса). Общая площадь делянки полевого опыта составляла 15 м<sup>2</sup>, учетная – 12 м<sup>2</sup>. Почва опытного участка дерново-подзолистая песчаная, характеризовалась следующими агрохимическими показателями: рН<sub>KCl</sub> 5,0, содержание гумуса – 1,16%, содержание подвижного фосфора и калия – 317 и 250 мг/кг почвы соответственно.

Для установления размеров перехода цезия-137 и стронция-90 в сельскохозяйственную продукцию определяли содержание радионуклидов в сопряженных пробах растениеводческой продукции и почвы, а затем рассчитывали коэффициенты перехода ( $K_p$ ).

В лабораторных опытах изучали влияние полимера на структуру почвы. Для этого пробы почвы обрабатывали разными дозами водного раствора полимера, высушивали, затем производили агрегатный анализ почвы (по Н. И. Савинову) и рассчитывали коэффициент структурности ( $K_{стр}$ ). Мокрое просеивание производили по методу И. М. Бакшеева на соответствующем приборе. По результатам анализа рассчитывали суммарное количество агрегатов более 0,25 мм.

Для оценки степени доступности радионуклидов растениям определяли содержание водорастворимой формы цезия-137 и стронция-90 в почве.

Содержание цезия-137 в почвенных и растительных пробах, стронция-90 в растительных пробах определяли на  $\gamma$ - $\beta$ -спектрометре МКС-АТ 1315, стронция-90 в почве – радиохимическим методом по стандартной методике.

**Результаты и их обсуждение.** Исследования показали, что обработка почвы новым полимером-сорбентом оказала положительное влияние на урожайность зерна овса в большинстве вариантов опыта (табл. 1). Так, в первый год исследований наибольшая урожайность зерна была в V варианте (доза полимера 10 мг/кг почвы) – 23,8 ц/га, несколько ниже – в VI варианте (доза 20 мг/кг). В этих вариантах прибавка урожая составила 8,9 и 7,0 ц/га, или 59,7 и 47,0% соответственно. В остальных вариантах урожайность была значительно ниже. Вариант II (доза полимера 0,5 мг/кг) не имел преимуществ относительно контроля как в первый, так и второй год.

Исследованиями установлено, что значения коэффициентов перехода цезия-137 из почвы в зерно овса во всех опытных вариантах оказались ниже, чем на контроле. Минимальные значения  $K_{\text{п}}$  были получены в вариантах, где полимер вносили из расчета 1 и 40 мг на кг почвы, – 0,0076 и 0,0085, что было ниже относительно контроля в 1,9 и 2,1 раза, или на 47,2 и 52,8% соответственно. По урожайности эти варианты незначительно отличались от контроля, что позволяет сделать следующий вывод: снижение значений  $K_{\text{п}}$  в них обусловлено в основном связыванием цезия-137 в почве полимером, а не биологическим разбавлением концентрации радионуклида (за счет увеличения массы зерна). Значительно ниже, чем в контрольном варианте, было значение  $K_{\text{п}}$  и в варианте с дозой внесения 10 мг/кг. Однако в данном случае его снижение было обусловлено в большей степени биологическим разбавлением радионуклида, так как этот вариант обеспечил максимальную урожайность зерна овса.

Таблица 1. Влияние обработки почвы новым полифункциональным полимером на урожайность сельскохозяйственных культур и параметры накопления радионуклидов

Вариант опыта, доза полимера, мг/кг	Урожайность, ц/га		Прибавка, %		$K_{\text{п}}$			
	овес (зерно)	горохо-овсяная смесь	овес (зерно)	горохо-овсяная смесь	$^{137}\text{Cs}$		$^{90}\text{Sr}$	
					овес (зерно)	горохо-овсяная смесь	овес (зерно)	горохо-овсяная смесь
I. Контроль (без обработки)	14,9	125,4	–	–	0,0161	0,0160	1,495	3,95
II. 0,5	13,7	113,2	– 8,1	– 9,7	0,0131	0,0115	1,041	2,10
III. 1	16,5	121,0	10,1	– 3,5	0,0076	0,0066	0,826	1,40
IV. 5	15,7	138,4	4,7	10,4	0,0124	0,0042	1,140	1,60
V. 10	23,8	148,8	59,7	18,7	0,0100	0,0091	1,309	1,98
VI. 20	21,9	133,6	47,0	6,5	0,0144	0,0124	1,420	1,85
VII. 30	18,7	135,2	25,5	7,8	0,0131	0,0076	1,408	3,41
VIII. 40	16,0	141,0	7,4	12,4	0,0085	0,0154	1,465	2,65
НСР <sub>05</sub>	1,8	15,4	–	–	–	–	–	–

Применение полимера оказало влияние и на параметры накопления стронция-90 зерном овса. Положительный эффект был достигнут в диапазоне доз применения полимера 0,5–10 мг/кг почвы, где урожайность зерна овса не имела существенных различий с контролем, а значения  $K_{\text{п}}$  снизились на 12,4 ÷ 44,7%, при более высоких дозах применения полимера различия с контролем были незначительными. Результаты, полученные в следующем вегетационном периоде, т.е. через год после обработки почвы полимером, показали, что он обладает последействием, что отразилось как на урожайности зеленой массы горохо-овсяной смеси, так и параметрах накопления радионуклидов цезия-137 и стронция-90.

Последействие полимера в варианте IV (доза 5 мг/кг) обеспечило прибавку урожая зеленой массы на 13,0 ц/га, что составило 10,4%. Еще более эффективной оказалась доза 10 мг/кг, в этом варианте опыта была достигнута максимальная урожайность – 148,8 ц/га, при этом прибавка составила 23,4 ц/га, или 18,7%. Урожайность в вариантах с более высокими дозами полимера – 20, 30 и 40 мг/кг осталась на уровне предыдущих вариантов, однако, во всех этих вариантах она была выше, чем на контроле.

Во всех вариантах опыта, где применяли полимер, значения  $K_{\text{п}}$  были ниже, чем в контрольном варианте. Снижение значений  $K_{\text{п}}$  для цезия-137 составляло 4,3–73,9%, для стронция-90 – 13,7–64,6%. Максимальный радиологический эффект во второй год исследований был достигнут в вариантах III и IV по обоим радионуклидам. При этом в вариантах с низкими дозами применения полимера (0,5 и 1 мг/кг) снижение значений  $K_{\text{п}}$  составило 1,4 и 2,4 раза по цезию-137 и 1,9 и 2,8 по стронцию-90 и было обусловлено в основном связыванием радионуклидов полимером в почве, а в остальных как связыванием радионуклидов, так и биологическим разбавлением.

Анализ полученных результатов показал, что с агрономической точки зрения наиболее эффективным оказалось применение полимера в дозе 10 мг/кг, с радиологической точки зрения – 1, 5 и 10 мг/кг почвы.

Изучение влияния полимера на структуру почвы (табл. 2) показало, что максимальное влияние на структуру дерново-подзолистой песчаной почвы оказали дозы полимера 2,5 и 5 мг/кг. Значения коэффициентов структурности за счет применения полимера в этих вариантах увеличились от 0,82 на контроле, где полимер не применяли, до 1,13 и 1,09, т.е. на 37,8 и 32,9% соответственно. Дальнейшее увеличение доз полимера привело к снижению значений коэффициентов структурности. Это обусловлено тем, что превышение концентрации раствора полимера сверх некоторой оптимальной величины приводит к изменению конформации макромолекул – к их сворачиванию и образованию глобул, уже не способных усиливать прочность коллоидной структуры в почве. Во всех вариантах опыта, где применяли полимер, водопрочность агрегатов была выше, чем в контрольном варианте. Максимальное влияние на водопрочность агрегатов почвы оказало применение полимера в дозе 10,0 мг/кг, при этом она увеличилась от 30,7 до 39,4%.

По мнению ряда ученых, растения поглощают из почвы радионуклиды, находящиеся в водорастворимом и обменном состояниях. Относительное количество радионуклидов в доступных для растений формах изменяется с течением времени. В настоящее время основная доля цезия-137 находится в связанной форме. В дерново-подзолистых супесчаных и песчаных почвах доля его доступных форм находится в пределах 10–20%, при этом на долю водорастворимой формы приходится менее 1%. Доля доступных форм стронция-90 в дерново-подзолистых почвах достигает более 70% [2, 6].

Таблица 2. Влияние полимера на структуру почвы

Показатель	Вариант опыта, доза полимера, мг/кг							
	I. Контроль (без полимера)	II. 0,5	III. 1,0	IV. 2,5	V. 5,0	VI. 10,0	VII. 20,0	VIII. 40,0
Коэффициент структурности	0,82	0,87	0,92	1,13	1,09	0,89	0,85	0,82
Суммарное содержание агрегатов >0,25 мм, %	30,7	31,2	33,9	37,2	37,8	39,4	38,0	37,6

Таблица 3. Влияние полимера на относительное содержание водорастворимой формы цезия-137 и стронция-90 в дерново-подзолистой песчаной почве, %

Радионуклид	Вариант опыта, доза полимера, мг/кг							
	I. Контроль (без полимера)	II. 0,5	III. 1,0	IV. 2,5	V. 5,0	VI. 10,0	VII. 20,0	VIII. 40,0
Цезий-137	100	95,8	93,9	79,6	74,8	49,0	38,1	16,3
Стронций-90	100	84,2	55,6	56,7	53,8	52,0	47,4	50,9

Результаты исследований по изучению влияния полимера на содержание в почве наиболее доступной для растений водорастворимой формы цезия-137 и стронция-90 в почве приведены в табл. 3. Анализ полученных результатов показал, что за счет обработки почвы полимером-сорбентом произошло существенное снижение содержания в почве водорастворимой формы цезия-137. Двукратный эффект был достигнут при дозе 10,0 мг/кг, максимальный – при дозе полимера 40 мг/кг, где содержание водорастворимой формы уменьшилось в 5,2 раза.

Обработка почвы полимером-сорбентом оказала влияние и на содержание водорастворимой формы стронция-90. Однако здесь почти двукратный эффект был достигнут при дозе 1 мг/кг. Дальнейшее увеличение доз полимера не привело к существенному снижению содержания водорастворимой формы радионуклида в почве.

Различия в эффективности действия полимера на связывание радионуклидов в почве обусловлены их химическими свойствами, что, в свою очередь, определяет их поведение в почве. Следует также учитывать, что содержание цезия-137 в почве на порядок выше, чем стронция-90.

## Выводы

1. Обработка почвы новым полифункциональным полимером-сорбентом повышает урожайность сельскохозяйственных культур. Максимальную прибавку урожая за 2 года обеспечил вариант с обработкой почвы полимером из расчета 10 мг полимера на 1 кг пахотного слоя почвы. В первый год урожайность зерна овса относительно контроля повысилась за счет обработки по-

чвы полимером на 4,7–59,7%, второй год за счет его последействия урожайность зеленой массы повысилась на 6,5–18,7%.

2. Экспериментально подтверждено положительное влияние полимера на структуру минеральных почв и водопрочность почвенных агрегатов, что, безусловно, оказало влияние на урожайность возделываемых культур. Значения коэффициентов структурности дерново-подзолистой песчаной почвы за счет применения полимера увеличились на 6,1–37,8%, при этом водопрочность агрегатов возросла на 2,7–8,7%.

3. Применение полимера оказало существенное влияние на параметры накопления радионуклидов возделываемыми культурами. Максимальная кратность снижения значений  $K_n$  в 1-й год для цезия-137 составила 2,1 и стронция-90 – 1,8 раза, во 2-й – 3,8 и 2,8 раза соответственно. Следовательно, радиологическая эффективность применения полимера на второй год была в 1,6–1,8 раза выше, чем первый. Снижение значений  $K_n$  радионуклидов цезия-137 и стронция-90 из почвы в растения обусловлено как связыванием этих радионуклидов полимером, так и биологическим разбавлением.

4. Полимер оказывает влияние на урожайность сельскохозяйственных культур и параметры накопления радионуклидов как в год его применения для обработки почвы, так и на следующий год.

5. Обработка дерново-подзолистой песчаной почвы полимером-сорбентом снижает содержание в ней водорастворимой (наиболее доступной для растений) формы цезия-137 до 5 раз, стронция-90 – до 2 раз.

6. Полученные результаты позволяют утверждать о целесообразности создания новых полимерных веществ, обладающих полифункциональными свойствами, предназначенных для восстановления загрязненных радионуклидами почв.

## Литература

1. *Алексахин, Р. М.* Сельскохозяйственная радиоэкология: этапы эволюции и некоторые итоги / Р. М. Алексахин // *Вопр. радиац. безопас.* – 2007. – Спец. вып. – С. 4–12.
2. *Агеец, В. Ю.* Система агроэкологических контрмер в атмосфере Беларуси / В. Ю. Агеец. – Минск, 2001. – С. 103.
3. *Путятин, Ю. В.* Минимизация поступления радионуклидов  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{90}\text{Sr}$  в растениеводческую продукцию / Ю. В. Путятин. – Минск, 2008. – С. 12–52.
4. Рекомендации по ведению агропромышленного производства в условиях радиоактивного загрязнения земель Республики Беларусь на 2003–2005 годы / Ин-т почвоведения и агрохимии. – Минск, 2003. – С. 6–26.
5. *Богдевич, И. М.* Итоги и перспективы агрохимических защитных мер на загрязненных радионуклидами землях Беларуси / И. М. Богдевич // *Вес. Нац. акад. наук Беларусі. Сер. аграр. навук.* – 2011. – № 3. – С. 27–39.
6. Экологические, медико-биологические и социально-экономические последствия катастрофы на ЧАЭС в Беларуси / под ред. Е. Ф. Конопля, И. В. Ролевича. – Минск, 1996. – С. 223–224.
7. *Сельскохозяйственная радиоэкология* / Р. М. Алексахин и [др.]; под ред. Р. М. Алексахина, Н. А. Корнеева. – М.: Экология, 1992. – 400 с.
8. *Круглов, С. В.* Показатели специфической сорбционной способности почв и минеральных сорбентов в отношении  $^{137}\text{Cs}$  / С. В. Круглов, В. С. Анисимов, Л. Н. Анисимова, Р. М. Алексахин // *Почвоведение.* – 2008. – № 6. – С. 693–703.
9. *Лиштван, И. И.* Органо-минеральные мелиоранты почв для снижения поступления радионуклидов в продукцию растениеводства / И. И. Лиштван, А. М. Абрамец, М. М. Жишкевич, И. О. Матвиенко // *Сельскохозяйственная деятельность в условиях радиоактивного загрязнения: материалы междунар. науч.-практ. конф., Горки, 29 июня – 2 июля, 1998 г.* / Белорус. гос. с.-х. акад.; редкол.: А. Р. Цыганов [и др.]. – Горки, 1998. – С. 84–85.
10. Использование композиционных материалов при выращивании сельскохозяйственных культур на радиоактивно загрязненных землях / В. В. Копытков [и др.] // *Агроэкология.* – 2004. – Вып. 1. – С. 90–93.

*A. R. TSYGANOV, G. A. CHERNUKHA*

## AGROECOLOGICAL JUSTIFICATION OF THE APPLICATION OF A NEW POLYFUNCTIONAL POLYMER ON RADIONUCLIDE-CONTAMINATED SOILS

### Summary

Due to the experiment it's proved that treatment of sod-podzol sandy soil with the new polymer – poly-N,N-dimethyl-3,4-dimethylenpyrrolidine chloride – promotes the increase of oat grain yield by 4.7–59.7% in the first year of research, and by 6.5–18.7% in the second year of research. To a great extent it is connected with a positive effect of the polymer on the soil structure and soil aggregate water stability.

The application of the polymer influenced greatly on the parameters of radionuclide accumulation in crops. In the first year maximal multiplicity of reduction in  $K_n$  levels for cesium-137 was 2.1 times and for strontium-90–1.8 times, in the second year – 3.8 and 2.8 times respectively. Meanwhile, reduction in  $K_n$  levels of cesium-137 and strontium-90 radionuclides from soil to plants was caused by both radionuclide fixation with the polymer and by biological dilution.