

## Оценка критических уровней радиационного воздействия на сельскохозяйственные растения по морфометрическим и биохимическим показателям

М.А. Дубынина, А.А. Удалова  
ГНУ ВНИИСХРАЭ Россельхозакадемии, Обнинск

Защита человека от радиационного воздействия в настоящее время основывается на санитарно-гигиеническом принципе, направленном на ограничение поступления радиоактивных веществ в организм и снижение воздействия до пределов, не представляющих опасности для здоровья и генофонда. основополагающим подходом в отношении безопасности окружающей среды является антропоцентрический принцип, согласно которому защита биоты гарантирована, если стандартами радиационной защиты обеспечена безопасность человека. Но достаточность этого принципа в отношении охраны биоты не доказана (Алексахин, Фесенко, 2004).

Говоря о защите окружающей среды от воздействия ионизирующих излучений (ИИ), нельзя не обратить особое внимание на защиту агросферы, поскольку она является неотъемлемым компонентом биосферы Земли. Агрэкосистемы с одной стороны, являются начальным звеном ведущих к человеку пищевых цепочек, с другой – имеют более высокую чувствительность по сравнению с естественными экосистемами практически ко всем видам воздействия природного и антропогенного характера (Алексахин, 1990; Гераськин, 2009; Тихомиров, 1985).

С целью определения дозовых нагрузок, приводящих к проявлению негативных реакций разной степени, и установления пределов (нормативов) воздействия, не вызывающих необратимых последствий, следует обобщить существующую информацию о радиобиологических эффектах у живых организмов (Удалова, 2010). В частности, для уточнения критериев оценки предельно допустимого радиационного воздействия на агроценозы была создана база данных «Действие ионизирующих излучений на растения» (БД), в которую внесена информация о радиобиологических эффектах у культурных и дикорастущих растений, взятая из литературных источников (статей в научных журналах, монографий, диссертаций и т.д.). Целью данной работы являлось определение допустимых уровней радиационного воздействия на сельскохозяйственные растения при остром и хроническом облучении по морфометрическим и биохимическим показателям с использованием обобщенной в БД информации.

Работа по созданию и пополнению базы данных «Действие ионизирующих излучений на растения» ведется в ГНУ ВНИИСХРАЭ Россельхозакадемии с 2007 г. На данный момент БД содержит около 5100 записей. Каждая запись включает несколько пар числовых значений вида «уровень радиационного воздействия – биологический эффект»; количество таких пар (вложенных записей) – почти 19000. Данные получены из 282 первоисточников, изданных преимущественно на русском языке.

Биологические эффекты, возникающие у растений под действием ИИ, объединены в следующие основные группы: выживаемость, морфометрические изменения, продуктивность, заболеваемость, биохимические изменения, генетические эффекты. Данные по морфометрическим и биохимическим показателям получены из 144 первоисточников и составляют 35% (1538 записей) от общего числа наборов данных; они представлены 5234 вложенными записями (31% от всех вложенных записей).

При оценке критических уровней радиационного воздействия на растения использовали подход, предложенный J.Garnier-Laplace с соавт. (2006), а именно, в качестве критического уровня при остром облучении рассматривали дозу ИИ, которая приводит к изменению биологического показателя на 50% ( $ED_{50}$ ). В случае хронического действия критической считали мощность дозы ИИ, вызывающую снижение показателей на 10% ( $EDR_{10}$ ). Критические уровни воздействия для каждой культуры определяли на основе регрессионного анализа зависимостей “доза (мощность дозы) – биологический эффект”.

Исходные данные, включенные в БД, получены в экспериментальных и мониторинговых исследованиях разных авторов, использовавших разные методические подходы. Поэтому имеющаяся информация отличается высокой неоднородностью, большим разбросом по величине дозовых нагрузок и наблюдавшихся эффектов. Чтобы снизить влияние указанной неомогенности на результаты расчетов, имеющаяся в БД информация для восстановления дозовых зависимостей и оценки критических нагрузок предварительно была проверена на соответствие специально разработанным критериям качества, которые оценивали непротиворечивость исходных данных общим радиобиологическим представлениям, соблюдение формальных требований к входным данным для проведения регрессионного анализа и т.д.

Для определения критических дозовых нагрузок на сельскохозяйственные растения применяли 2 способа обработки данных: анализ объединенных данных и дифференцированный анализ отдельных наборов данных.

При анализе объединенных данных использовали все имеющиеся данные о радиобиологических эффектах для каждой культуры растений, дозовую зависимость определяли по линейной модели, где в качестве зависимой переменной рассматривали наблюдаемый биологический эффект, представленный в процентах к соответствующему контролю. Оценки критических дозовых нагрузок считали достаточно обоснованными, если:

1. регрессионная зависимость наблюдаемого эффекта от дозы или мощности дозы ИИ являлась статистически достоверной ( $p < 0,10$ );
2. для построения дозовой зависимости было использовано не менее 10 наборов данных вида «дозовая нагрузка - биологический эффект» ( $N \geq 10$ ).

В случае дифференцированного анализа отдельно рассматривали каждый набор данных (каждую запись), критические дозовые нагрузки определяли по двум моделям дозовой зависимости – линейной и логистической. Качество данных оценивали по следующим критериям:

1. объем выборки  $n$  должен быть достаточен для проведения регрессионного анализа;
2. изменение эффекта с дозой не противоречит существующим представлениям о биологическом действии радиации (стимулирующее действие не рассматривали);
3. по крайней мере одно значение наблюдаемого эффекта должно располагаться в интервале от 10% до 90% диапазона возможного изменения данного биологического эффекта;
4. предсказанное по восстановленной дозовой зависимости значение критической дозовой нагрузки не должно выходить за пределы интервала исследованных доз (или мощностей доз);
5. уровень значимости регрессии должен быть по крайней мере меньше 10% ( $p < 0,10$ ).

Результаты расчета критических дозовых нагрузок при объединенном анализе данных по изменению биохимических показателей при остром и хроническом облучении вегетирующих растений представлены в табл. 1.

Линейная зависимость наблюдаемых биохимических изменений от дозы статистически достоверна ( $p < 0,10$ ) для кукурузы и свеклы, а от мощности дозы – только для картофеля. Однако данные для свеклы представлены только одной записью ( $N=1$ ), содержащей 4 пары данных, поэтому полученное значение  $ED_{50}$  нельзя считать достаточно обоснованным. Число наборов данных для кукурузы и картофеля больше 10, что позволяет определить критические дозовые нагрузки, которые составили  $ED_{50}=1110,5$  Гр и  $EDR_{10}=66,4$  мГр/час, соответственно.

**Таблица 1 – Критические дозовые нагрузки для сельскохозяйственных растений по биохимическим показателям (объединенные данные)**

Культура	Острое облучение					
	<i>N</i>	<i>n</i>	<i>ED</i> <sub>50</sub> , Гр	95-% ДИ	<i>F</i>	<i>p</i>
Овес	5	24	81100	63940÷108700	1,6	0,22
Кукуруза	26	60	1110,5	762,4÷1760,2	3,6*	0,06
Горох	36	105	86900	–	0,0001	0,99
Бобы	17	34	904,4	–	0,06	0,81
Свекла	1	4	23,1	17,7÷29,2	25,5*	0,04
Хроническое облучение						
Культура	<i>N</i>	<i>n</i>	<i>EDR</i> <sub>10</sub> , мГр/ч	95-% ДИ	<i>F</i>	<i>p</i>
Овес	1	4	53,1	40,3÷74,8	17,2	0,34
Картофель	11	33	66,4	44,7÷86,2	19,6*	0,0001
Капуста пекинская	2	10	н.о.	–	0,0004	0,98

*N* - число наборов данных; *n* – число пар данных; *p* – уровень значимости критерия Фишера; \* – регрессионная зависимость статистически достоверна ( $p < 0,10$ ); – - установить 95-% ДИ не удалось; н.о. – не оценена дозовая нагрузка, т.к. наблюдается стимулирующее действие в данном диапазоне доз; серым цветом выделены культуры, по которым можно определить критические дозовые нагрузки ( $N \geq 10$ ,  $p < 0,10$ ).

Одной из основных причин слабой достоверности дозовых зависимостей является высокая негомогенность исходных данных. Кроме того, в диапазоне малых доз часто наблюдается стимулирующее действие радиации, что также снижает качество аппроксимации данных линейной зависимостью. Так, улучшение биохимических показателей наблюдалось у картофеля при мощности дозы 0,07 мГр/ч (до 202 % от контрольного уровня), у кукурузы – при дозах 1, 10, 100, 150 и 1000 Гр (до 390%). Наличие данных горметического типа уменьшает коэффициент наклона регрессионной зависимости, что, соответственно, может приводить к завышению оценок критических уровней радиационного воздействия.

Данных по морфометрическим изменениям у сельскохозяйственных растений при действии ИИ значительно больше по сравнению с данными по биохимическим показателям. Для большинства культур (11 из 14-ти при остром облучении, 8 из 15-ти – при хроническом) линейные зависимости радиобиологических эффектов от дозовых нагрузок являются статистически достоверными ( $p < 0,10$ ).

Требование достаточного объема данных ( $N > 10$ ) в условиях острого облучения выполняется для 5-ти культур, наиболее радиочувствительной из которых является пшеница ( $ED_{50} = 25,4$  Гр). При хроническом облучении оценки критической мощности дозы достаточно обоснованы только для двух культур (пшеница и ячмень), наименьшее значение  $EDR_{10} = 29,1$  мГр/ч получено для ячменя.

При дифференцированном анализе качество всех наборов данных о биохимических изменениях не удовлетворяло сформулированным выше критериям как при хроническом, так и при остром облучении растений, поэтому оценок  $EDR_{10}$  и  $ED_{50}$  получено не было.

Критические дозовые нагрузки по морфометрическим изменениям удалось определить для четырех культур – ячменя при хроническом облучении; яблони, кукурузы и пшеницы при остром облучении (табл. 2). В последнем случае кукуруза оказалась наиболее радиочувствительной.

Оценки, полученные по разным моделям дозовой зависимости (линейной и логистической), различаются незначительно. Большая дисперсия оценок  $EDR_{10}$  для ячменя, а также  $ED_{50}$  для яблони и пшеницы связана с малым количеством наборов данных ( $N = 3$ ), которые соответствуют 5 критериям качества.

**Таблица 2 – Критические дозовые нагрузки для сельскохозяйственных растений по морфометрическим показателям (дифференцированный анализ)**

Культура	N	EDR <sub>10</sub> , мГр/ч	
		Линейная модель	Логистическая модель
Ячмень	3	43,4 (-20,8÷107,7)	40,5 (24,5÷56,5)
		ED <sub>50</sub> , Гр	
Яблоня	3	59,3 (43,2÷75,3)	58,1 (43,9÷72,3)
Кукуруза	6	17,6 (14,3÷20,9)	16,9 (12,0÷21,8)
Пшеница	3	20,4 (9,8÷32,1)	17,4 (-0,1÷34,8)

N – число наборов данных; в скобках представлены 95% доверительные интервалы

Предельно допустимые дозовые нагрузки для агроценоза следует устанавливать таким образом, чтобы обеспечить защиту наиболее чувствительных культур. В табл. 3 представлены сводные результаты оценок критических доз и мощностей доз для самых радиочувствительных сельскохозяйственных растений, полученные двумя расчетными методами по данным о морфометрических и биохимических изменениях. Поскольку при дифференцированном анализе отдельных наборов данных результатов по биохимическим показателям не было получено, использование метода расчета критических дозовых нагрузок по объединенным данным следует признать более обоснованным.

**Таблица 3 – Критические дозовые нагрузки для наиболее радиочувствительных сельскохозяйственных растений**

Биохимические изменения			Морфометрические изменения		
Объединенные данные	Дифференцированный анализ		Объединенные данные	Дифференцированный анализ	
линейная	линейная	логистическая	линейная	линейная	логистическая
Острое облучение					
1110,5 Гр	-	-	25,4 Гр	17,6 Гр	16,9 Гр
Хроническое облучение					
66,4 мГр/ч	-	-	29,1 мГр/ч	43,4 Гр	40,5 мГр/ч

В разработанной БД информация о радиационно-индуцированных биохимических изменениях представлена более скудно, чем для морфометрических эффектов. Кроме того, морфометрические показатели более радиочувствительны (табл. 3). Таким образом, из двух изученных в данной работе групп радиобиологических эффектов именно морфометрические изменения следует использовать для установления допустимых уровней воздействия, так как этот критерий следует признать более чувствительным и лучше обеспеченным достоверными данными.

Если принять метод расчета по объединенным данным как более предпочтительный, то в целом для агроценоза, согласно проведенным расчетам, предельно допустимый уровень радиационного воздействия не должен превышать 25,4 Гр (95%-ный доверительный интервал – 23,5÷27,3 Гр) при остром облучении и 29,1 мГр/ч (95%-ный ДИ – 13,9÷46,0 мГр/ч) при хроническом облучении.

Ограниченный объем доступной информации, несовершенство методического и дозиметрического обеспечения в работах-первоисточниках, высокая вариабельность значений биологических показателей, погрешности аппроксимаций и множество других причин приводят к существенной неопределенности оценок допустимых уровней воздействия ИИ на биоту. Для научного обоснования экологических нормативов допустимого воздействия ИИ необходимо совершенствовать методические подходы к его нормированию, продолжить накопление данных и критический анализ имеющейся информации. Накопле-

ние данных позволит установить критические дозовые нагрузки на сельскохозяйственные растения по другим группам радиобиологических эффектов (цитогенетические, заболеваемость) с учетом таких важных факторов, как вид излучения ( $\gamma$ -,  $\beta$ - и т.д.), пути облучения (внутреннее/внешнее), биологические особенности культур, фазы их развития в момент воздействия ИИ.

#### Список литературы

1. Алексахин Р.М., Фесенко С.В. Радиационная защита окружающей среды: антропоцентрический и экоцентрический принципы // Радиационная биология. Радиоэкология. – 2004. – Т. 44. – № 1. – С. 93-103.
2. Алексахин Р.М. Тяжелые естественные радионуклиды в биосфере. / Р.М. Алексахин, Н.П. Архипов, Р.М. Бархударов – М.: Наука, 1990. – 368 с.
3. Гераськин С.А., Санжарова Н.И., Спиридонов С.И. Методы оценки устойчивости агроэкосистем при воздействии техногенных факторов. Обнинск: ВНИИСХРАЭ, 2009. – 134 с.
4. Тихомиров Ф.А. Современные проблемы и научно прикладные задачи радиозологии. // Известия высшей школы. Биологические науки. – 1985. – №1. – С. 5-15.
5. Удалова А.А., Ульяненко Л.Н., Алексахин Р.М. Методология оценки допустимого воздействия ионизирующих излучений на агроценозы // Радиационная биология. Радиоэкология. – 2010. – Т. 50. – № 5. – С. 1–10.
6. Garnier-Laplace J., Della-Vedova C., Gilbin R. First derivation of predicted-no-effect values for freshwater and terrestrial ecosystems exposed to radioactive substances // Environ. Sci. Technol. – 2006. – V. 40. – P. 6498–6505.