

ЛЕКЦИЯ 9

РАДИОБИОЛОГИЯ РАСТЕНИЙ

Радиобиологические эффекты растений при остром и хроническом облучении

1. Сравнительная радиочувствительность семян

2. Радиочувствительность растений

1. Сравнительная радиочувствительность семян.

Основное назначение семян – сохранение до всходов генетической информации вида. После облучения семян ионизирующим излучением изучают ростовые реакции проростков и вегетирующих растений на разных фазах его развития, т.е. от всходов до полного созревания. *Радиобиологические реакции семян зависят от многих факторов, среди которых наибольшее значение имеют доза облучения, условия и способы облучения, и биологические особенности семян.*

Облучение семян в малых дозах (десятые доли Гр) отрицательных последствий не вызывает. При облучении дозой от 1 до 25 Гр наблюдается стимуляция ростовых процессов в результате ускорения клеточного деления и роста растений. Облучение в повышенных дозах (30-50 и более Гр) вызывает задержку ростовых процессов, которая может быть кратковременной или длиться весь период вегетации. Облучение дозами более 100 Гр приводит к полной потере способности клеток меристем к делению, поэтому проростки растут только за счет растяжения клетки. Согласно классификации Е.И. Преображенской семена по радиочувствительности разделяются на 3 группы:

1 группа – радиочувствительные семена – 15-25 Гр;

2 группа – среднерadiочувствительные семена – 25-100 Гр;

3 группа – высокорadiоустойчивые семена – более 100 Гр.

В этой классификации радиочувствительность оценивалась по критерию выживаемости растений к концу вегетационного периода.

При одинаковой величине дозы облучения и одинаковой мощности дозы облучения максимальные радиобиологические эффекты у семян наблюдаются при облучении их альфа- и бета-излучением. При фракционировании дозы радиоустойчивость снижается, потому что усиливается поражение клеток зародыша.

Большое влияние на радиочувствительность семян *оказывает влажность семян, температура и наличие кислорода и пострадиационные условия питания.* Для прорастания семян необходимо наличие воды, поэтому при облучении влажных семян создаются условия для большего выхода свободных радикалов H^0 и OH^0 и их активного взаимодействия с кислородом, поэтому с увеличением влажности семян их радиочувствительность возрастает. Максимальная радиоустойчивость у семян, находящихся в воздушно-сухом состоянии, т.е. в состоянии покоя. Семена, облученные в атмосфере кислорода, повреждаются сильнее, чем облученные в атмосфере азота, инертного газа и в вакууме. Это связано с проявлением кислородного эффекта. Кислородный эффект характеризуется с одной стороны усилением поражения клеток зародыша, а с другой стороны – увеличением

интенсивности процессов репарации. При наличии кислорода по причине образования большего количества перекисных соединений усиливается поражение клеток зародыша. При нагревании семян в клетках зародыша уменьшается содержание воды и кислорода, поэтому повышается радиоустойчивость семян. *Максимальная радиочувствительность семян* при облучении в оптимальной температуре и при оптимальной влажности. Установлено, что облучение семян при температуре сухого льда (-78°C) приводит к меньшему поражению клеток зародыша, чем облучение при нормальной температуре (20°C). При прорастании облученных семян на радиоустойчивость может оказывать влияние наличие в питательной среде основных элементов питания. Установлено, что повышенное содержание азота способствует ускорению деления клеток и повышению радиоустойчивости. В то же время оптимальное содержание фосфора, калия и кальция способствует повышению радиоустойчивости.

Среди биологических особенностей наибольшее влияние на радиоустойчивость семян оказывает *филогенез, состояние зародыша, набор и объем хромосом в клетках зародыша, возраст, размер и биохимический состав семян*. Установлено, что значительное влияние на радиоустойчивость семян оказывает филогенез или эволюционное развитие. Максимальная радиоустойчивость у семян голосеменных растений. Семена покрытосеменных растений более радиоустойчивы. Среди цветковых более древние примитивные формы имеют повышенную радиоустойчивость (семена семейств магнолиевые и лилейные), чем более поздние. Семена древесных и кустарниковых форм более радиоустойчивы, чем травянистых. Радиоустойчивые и среднерadioустойчивые семена входят в класс однодольных растений. Семена двудольных растений по радиоустойчивости равномерно распределены по трем группам. Связь радиоустойчивости с филогенезом наблюдается не только в пределах семейств и родов, но и в пределах вида. Например, для рода *Triticum* (пшеница) виды, возникшие в более ранние периоды эволюции, более радиоустойчивы. Согласно данным таблицы 2 для *Triticum monococcum*, имеющей более раннее эволюционное происхождение, полулетальная доза составляет 150-200 Гр, а для *Triticum aestivum*, которая имеет более позднее происхождение полулетальная доза составляет более 600 Гр. Виды пшеницы различаются по количеству хромосом. Для *Triticum monococcum* $2n=14$; для *Triticum dicoccum* $2n=28$; для *Triticum spelta*, *Triticum compactum*, *Triticum spaeococcum* и *Triticum aestivum* $2n=42$. Поэтому здесь подтверждается закономерность, указывающая на то, что чем больше хромосом, тем выше радиоустойчивость, или чем меньше хромосом, тем выше радиоустойчивость.

Таблица 1 – Радиоустойчивость видов рода *Triticum*

Вид пшеницы	ЛД ₅₀ (Гр)
<i>Triticum monococcum</i>	150-200
<i>Triticum dicoccum</i>	250-300
<i>Triticum spelta</i>	350
<i>Triticum compactum</i>	более 350
<i>Triticum spaeococcum</i>	более 500
<i>Triticum aestivum</i>	более 600

У семейства бобовые близкородственные формы имеют одинаковые фенотипические и генотипические изменения, вызванные облучением. Кроме видового полиморфизма у многих растений выявлен сортовой и внутрисортовой полиморфизм по радиочувствительности, при этом сортовое различие составляет от 1,5 до 5 раз, а внутрисортовое различие (между линиями сорта) доходит до 3 раз. На радиочувствительность семян оказывает влияние состояние зародыша в момент облучения. На семенах зерновых культур установлено, что семена, облученные в состоянии неполной зрелости, т.е. в фазах молочной и восковой спелости, более радиочувствительны, чем семена, находящиеся в фазе полной спелости. Это объясняется тем, что в фазе полной спелости зародыш хорошо развит и полностью сформирован, а в фазах молочной и восковой спелости зародыш недоразвит и поэтому более радиочувствителен. Хромосомы, находящиеся в зародышевых клетках семени, при облучении семян также повреждаются. При этом повреждение семян зависит от степени повреждения хромосом. Установлено, что чем больше объем ядерных хромосом, тем выше радиочувствительность семян. В тоже время, чем выше плоидность (или чем больше хромосом в клетках), тем выше радиоустойчивость семян. У большинства видов семена тетраплоидных форм более устойчивы к облучению, чем семена диплоидных форм.

С увеличением возраста семян или длительности их хранения радиочувствительность возрастает. Это доказано при анализе частоты хромосомных aberrаций в клетках меристем проростков. Например, при хранении семян пшеницы 13-17 лет в клетках меристем регистрировалось на 40% больше хромосомных нарушений, чем при хранении семян 2-3 года. Зависимость радиочувствительности семян от их размера носит случайный характер. При этом в некоторых случаях установлено, что с увеличением размера семян возрастает их радиочувствительность. Это четко прослеживается среди семян бобовых культур, у которых в зависимости от размера семян значительно изменяется величина полулетальной дозы (ЛД₅₀). При этом выявлено, что чем крупнее семена, тем меньше величина полулетальной дозы (табл. 3). Согласно данным этой таблицы, 50% семян бобов погибает при дозе 40-60 Гр, а люцерны – при дозе 700-900 Гр. Разница радиочувствительности семян между бобами и люцерной составляет 15 раз.

Таблица 2 – Радиочувствительность семян бобовых культур

Культура	ЛД ₅₀ (Гр)
Бобы	40-60
Горох	120-270
Маш	300-500
Клевер	500-700
Люцерна	700-900

На радиочувствительность оказывает влияние *биохимический состав семян*. Семена с повышенным содержанием жира (ненасыщенных жирных кислот), аскорбиновой кислоты, ауксинов, аминокислот, железа, кальция, бора, а также веществ, содержащих сульфгидрильную группу, выделяются высокой радиоустойчивостью.

В качестве критериев радиочувствительности семян используют энергию прорастания и лабораторную всхожесть семян, полевую всхожесть,

выживаемость проростков, процент поврежденных клеток в меристемах проростков, процент хромосомных aberrаций в клетках меристем проростков, снижение митотической активности в клетках меристем и нарушение роста и развития проростков.

2. Радиочувствительность растений

Жизнь на земле зарождалась, развивалась и продолжает развиваться в радиационной среде. Естественный отбор в растительном мире сопровождался совершенствованием микро- и макроструктур, изменением генома и изменением радиочувствительности. Высокая радиоустойчивость часто связана с высокой общей устойчивостью растений к неблагоприятным условиям внешней среды, потому что приспособление видов к различным условиям могли совпадать с повышенной радиоустойчивостью. Причины и механизмы естественной радиочувствительности растений к настоящему времени не раскрыты, однако многие аспекты хорошо изучены. На радиочувствительность растений оказывают влияние следующие факторы, которые разделяются на 3 группы:

1 группа – факторы, связанные с филогенезом, которые нельзя изменить (семейство, класс, вид, морфология, ploидность, объем ядра, объем хромосом и др.) Четкой связи между филогенезом и радиоустойчивостью у растений не выявлено, однако, у семян связь четкая, которая проявляется даже в пределах вида. Известно, что голосеменные растения более радиочувствительны, чем покрытосеменные. Папоротники и мхи превышают радиоустойчивость цветковых растений. Радиочувствительность различается по семействам, видам, родам и сортам. Среди цветковых растений к радиочувствительным относят растения семейств магнолиевоцветные, лавроцветные, лилийноцветные, ирисовые, камнеломковые и бобовые, а к радиоустойчивым – растения семейств крапивные, крестоцветные, гераниецветные, гвоздикоцветные. Выделяют также средне чувствительные растения (семейства гречихоцветные, миртовые, макоцветные) и полиморфные (мятликовые, астровые и норичниковые). Установлено, что критические дозы облучения семян на порядок выше, чем вегетирующих растений. Растения сельскохозяйственных культур по радиочувствительности различаются в 2-10 раз, видовое различие составляет 1,5-15 раз, сортовое различие – 1,5-3 раза. Среди сельскохозяйственных культур выявлены высокорadioчувствительные культуры, для которых полулетальная доза (ЛД₅₀) составляет 10-40 Гр. В семействе злаковых к таким культурам относят ячмень, рожь, овес, пшеницу, кукурузу, а семействе бобовых – горох, вику и фасоль. К высоко радиоустойчивым культурам относят рапс, кормовую, сахарную и столовую свеклу, морковь и капусту (ЛД₅₀=200-250 Гр), а также картофель и лен (ЛД₅₀ =100-150 Гр). Другие культуры занимают промежуточное положение. У гибридов пшеницы, ячменя, кукурузы и шпината выявлена повышенная радиоустойчивость по сравнению с родительскими формами. С увеличением размера хромосом и количества ДНК возрастает радиочувствительность. Связь радиочувствительности с ploидностью не всегда носит прямую зависимость. У природных полиploидных родов зависимости нет, в тоже время иногда наблюдается обратная связь. У культурных растений, таких как пшеница, сорго, кукуруза и горчица установлено, что чем больше ploидность, тем выше радиочувствительность.

2 группа – факторы, характеризующие состояние клетки и генома (этап онтогенеза, наличие естественных радиопротекторов, антиоксидантов и способность клеток к репарации). Установлено, что радиочувствительность клеток зависит от фазы клеточного цикла, содержания в клетках воды, степени защищенности ДНК белками, наличия естественных радиопротекторов, концентрации кислорода и способности клеток к репарации и регенерации, т.е. к восстановлению и самообновлению. Для растений установлено, что самая низкая радиостойчивость отмечается при прорастании семян, а также при переходе растений от вегетативного состояния к генеративному и в гаметогенезе.

3 группа – факторы внешней среды и условия облучения (температура, свет, влажность, условия питания, методы и способы облучения растений). Максимальное поражение растений наблюдается при облучении альфа- и бета-излучением, а также при фракционировании дозы облучения. При облучении растений при оптимальной температуре (18-20⁰С) радиостойчивость понижается. Повышение и понижение температуры способствует повышению радиостойчивости растений, потому что замедляется деление меристемных клеток. На радиочувствительность также оказывают влияние до- и пост- радиационные условия: улучшенное минеральное питание, повышенная освещенность и влажность, наличие кислорода способствуют повышению радиочувствительности. Особое влияние на радиочувствительность оказывают эколого-географические факторы. Популяции растений с широким ареалом распространения более радиостойчивы, чем популяции растений с узким ареалом распространения. Радиочувствительны редкие и исчезающие виды.

Для количественной оценки радиочувствительности чаще используют летальную дозу (L_{100}), полuletальную дозу (LD_{50}) и критическую дозу (LD_{70}). Летальная доза – это доза, при облучении которой погибает 100% растений. Полuletальная доза – это доза, при облучении которой погибает 50% растений. Критическая доза – это доза, при облучении которой погибает 70% растений. У большинства сельскохозяйственных культур величина доз, вызывающих гибель 50 и 70% растений, приводит к полной потере продуктивности. Поэтому, при облучении растений используют дозу, вызывающую снижение урожайности на 50% (UD_{50}). Разница между LD_{50} и UD_{50} для одного и того же вида растений может составлять 10-30 и более раз. В зависимости от цели исследования применяют также дозы UD_{10} и UD_{30} .

Лучевое поражение растений зависит от дозы облучения и проявляется в виде замедления роста и развития, нарушений репродуктивной системы, снижении урожайности и гибели растений. Радиобиологические эффекты растений в зависимости от величины дозы приведены в таблице 3.

Таблица 3 – Радиобиологические эффекты растений в зависимости от величины дозы облучения

Процент от дозы, вызывающей 100% гибель растений, Гр	Реакция растений на облучение
10	Вид растений нормальный
25	Снижение роста на 10%
35	Снижение роста на 50%
40	Стерильность пыльцы

45	Задержка образования генеративных органов
60	Резкое угнетение роста
75	50% растений погибает
100	100% растений погибает

Для оценки радиочувствительности растений при остром и хроническом облучении используют различные критерии:

1) всхожесть (полевая и лабораторная); 2) длина зародышевых корешков у проростков; 3) рост и развитие растений; 4) количество образовавшихся органов (число стеблей, соцветий и т.д.); 5) число завязавшихся семян (на 1 растении или на одном репродуктивном органе); 6) масса плодов и семян с растения; 7) выживаемость растений в фазах развития; 8) выживаемость растений к концу вегетационного периода; 9) частота морфозов органов; 10) частота хлорофильных мутаций; 11) частота хромосомных aberrаций в клетках; 12) стерильность растений и пыльцы; 13) продуктивность растений; 14) урожайность (масса растений с 1 м², с 10 м² и с 1 га). На практике чаще используют выживаемость растений к концу вегетационного периода. Этот критерий характеризует реакцию всей популяции на облучение.