

С. В. Литвинов

Институт клеточной биологии и генетической инженерии НАН Украины, Киев

ВЛИЯНИЕ ХРОНИЧЕСКОГО ОБЛУЧЕНИЯ СЕМЯН И ПРОРОСТКОВ *ARABIDOPSIS THALIANA* МАЛЫМИ ДОЗАМИ γ -РАДИАЦИИ НА РОСТ И РАЗВИТИЕ РАСТЕНИЙ

Представлены результаты изучения действия хронического γ -облучения в малых дозах проростков и семян *A. thaliana* на рост и развитие растений. Мощность поглощенной дозы для семян составила 0,45 мГр/ч (общая поглощенная доза 30 сГр), для проростков 0,18 мГр/ч (общая поглощенная доза 3 сГр). Между опытным и контрольным вариантом (облученные проростки) выявлены статистически достоверные различия по показателям энергии прорастания, времени формирования первичной розетки, длине гипокотыля. Растения из облученных семян опережали контрольные по скорости роста стебля, раньше начинали цвести и образовывать стручки, но имели в среднем более короткий вегетативный цикл и раньше отмирали. В проведенных нами экспериментах показано значимое влияние малых доз хронического γ -облучения семян и проростков *A. thaliana* на показатели, характеризующие рост и развитие растений.

Ключевые слова: хроническое облучение, малые дозы радиации, онтогенез растений, радиобиологические эффекты, фенотификация.

Введение

В современной радиобиологии проблема малых доз занимает особое место. Вопрос о непосредственных и отдаленных последствиях облучения живых организмов в малых дозах имеет большое значение для фундаментальной науки, а также в связи с прикладными аспектами разработки и использования биологических тест-систем. Немалый практический интерес представляет изучение влияния малых дозовых нагрузок пролонгированного и хронического ионизирующего излучения на биологические объекты в условиях длительных космических полетов [1].

Для своей работы мы выбрали распространенное модельное растение – резуховидку Таля (*A. thaliana*). Наш выбор был обусловлен, с одной стороны, доступностью методик культивирования этого растения, его коротким жизненным циклом, а с другой – противоречивостью информации о влиянии малых доз ионизирующей радиации с низкой ЛПЭ на рост и развитие сосудистых растений [1, 2 - 7]. При этом *A. thaliana* считается нечувствительным к малым дозам облучения модельным объектом, поэтому количество работ по данной проблеме с его использованием крайне ограничено [6, 7]. Целью нашей работы было изучить динамику вегетативных и генеративных характеристик растений *A. thaliana*, развивающихся из облученных семян и проростков.

Материалы и методы

Нами было осуществлено хроническое облучение γ -источником на основе хлорида ^{137}Cs воздушно-сухих семян и проростков *A. thaliana* линии Col-0. Семенной материал подвергался

облучению перед проращиванием, а проростки облучали непосредственно во время прорастания. Семена получили общую дозу 30 сГр в течение 28 сут (мощность излучения 0,45 мГр/ч), проростки – 3 сГр за 7 сут (мощность дозы 0,18 мГр/ч). Выбранные мощности и дозы не превышают нормативных границ малых доз, принятых UNSCEAR и МАГАТЭ [1, 8].

Семена *A. thaliana* хранились 2 года в состоянии физиологического покоя в условиях холодной стратификации при температуре 4 °С. Семенной материал перед высадкой стерилизовали в течение 15 мин смесью 96 % этилового спирта и 5 % перекиси водорода в соотношении 1:1. Проростки выращивали в условиях стерильной культуры в чашках Петри 100 × 20 мм на среде MS под осветительной установкой при следующих условиях культивирования: освещенность 4 клк, световой день 16 ч, $t = 21 - 23$ °С). 10-дневные проростки пересаживали на поверхность почвенной смеси в полипропиленовый стакан 200 мл. Почвенную смесь готовили на основе универсального субстрата «Полесский» (рН 5,5 - 6,5) и просеянного автоклавируемого песка – 1 часть песка на 2 части субстрата. За 2 сут до высадки проростков и семян почвенную смесь стерилизовали раствором KMnO_4 .

В ходе эксперимента определялись следующие показатели роста и развития растений в опытной и контрольной группах (выбор интервала между наблюдениями в 7 сут обусловлен длительностью фаз вегетационного цикла арабидопсиса – порядка нескольких недель):

1) энергия прорастания семян на 7-е сутки (доля проросших семян по отношению к количеству посеянных);

2) длина гипокотилия (мм) на 7-е сутки. Измерение проводилось по масштабированным фотографическим снимкам стандартными средствами пакета Image J2x;

3) доля проростков: 3.1) с зелеными семядолями и 3.2) с первичной розеткой из двух семядоль и двух первых настоящих листьев – среди проростков, образовавших розетку на 7-е сутки;

4) количество листьев в розетке на момент начала активного роста главного стебля;

5) длина и скорость роста стебля (мм) – каждые 7 сут (в случае снятия апикального доминирования измерялась длина стебля первого порядка до основания ведущего стебля второго порядка и длина самого ведущего стебля второго порядка);

6) время (неделя) появления первого раскрывшегося цветка на побеге;

7) количество стручков на каждом растении;

8) количество ингибированных и отстающих в развитии растений;

9) количество растений с явно выраженными фенотипическими аномалиями;

10) количество засыхающих и засохших растений;

11) продолжительность вегетации в неделях;

12) сухая масса (мг) надземной части побега после окончания вегетации и засыхания.

На основе названных характеристик рассчитывали абсолютные и относительные показатели роста и развития растений. Поскольку не наблюдалось видимых различий между а) облученными и необлученными проростками *после* их пересадки на грунт, а также между б) проростками из облученных и необлученных семян *до* пересадки, для них не рассчитывались следующие показатели: а) 4 - 12, б) 2, 3. В последние две недели в каждой из серий опытов морфометрические параметры нами не фиксировались, так как никаких видимых изменений, кроме засыхания растений, не наблюдалось.

В каждой из трех повторностей опытов сравнивали 100 контрольных и 100 облученных проростков, 60 контрольных растений и 60 растений, выращенных из облученных семян. Сравнение групп производили с использованием стандартных статистических методов [9]. В случае нормально распределенных величин – на основе двухвыборочного t-критерия Стьюдента. Для величин, распределение которых в соответствии с критерием Колмогорова - Смирнова значимо отличалось от нормального ($p < 0,05$), применяли непараметрические тесты – U-тест Манна - Уитни и двухвыборочный тест Колмогорова - Смирнова. Статистическую значимость оценивали по

методу Монте-Карло. Определяли меры центральной тенденции – среднюю и медиану, меры вариации – дисперсию, стандартную ошибку и коэффициент вариации. Интервальные оценки строились с помощью процедуры бутстрепа дающей возможность получить надежные оценки для небольших выборок без предположения о виде генерального распределения признака).

Групповые параметры в каждой из трех серий опытов усредняли, индивидуальные значения анализировали как отдельные статистические единицы. Межгрупповые сравнения проводили с использованием методов дисперсионного анализа, корреляционного анализа на основе коэффициента корреляции Пирсона, регрессионного анализа.

Результаты

Несмотря на малую величину выбранных нами доз радиации, эффект их значимого влияния на жизненные процессы *A. thaliana* был очевиден. В первую очередь это касается прорастания в условиях хронического низкодозового облучения и роста растений, полученных из облученных семян. Так, энергия прорастания семян на 7-е сутки хронического облучения с мощностью дозы 0,18 мГр/ч на 19 % превосходит контрольный показатель ($p < 0,03$). В то же время проростки из облученных семян не демонстрируют подобных различий (рис. 1, а).

У облученных проростков раньше по сравнению с контрольной группой появляются зеленые семядоли, а затем и первые два настоящих листка (рис. 1, б). Также следует отметить ускоренный рост гипокотилия у растений опытного варианта (рис. 1, в). Межгрупповые различия по скорости роста гипокотилия становятся незначимыми для растений, у которых уже сформирована первичная розетка (рис. 1, г). Этот вывод подтверждается тем, что опытный и контрольный варианты проростков в фазе зеленых семядолей и первичной розетки гомогенны по дисперсии длины гипокотилия. Тем не менее мы фиксировали значимые различия между контрольной и экспериментальной группами по среднему значению данного морфометрического показателя. После образования розетки из двух настоящих листьев и двух семядолей снижается также коэффициент вариации длины гипокотилия. В то же время растения экспериментального и контрольного вариантов практически не различаются по длине корешков, хотя визуально наблюдается заметное искривление корней облученных проростков.

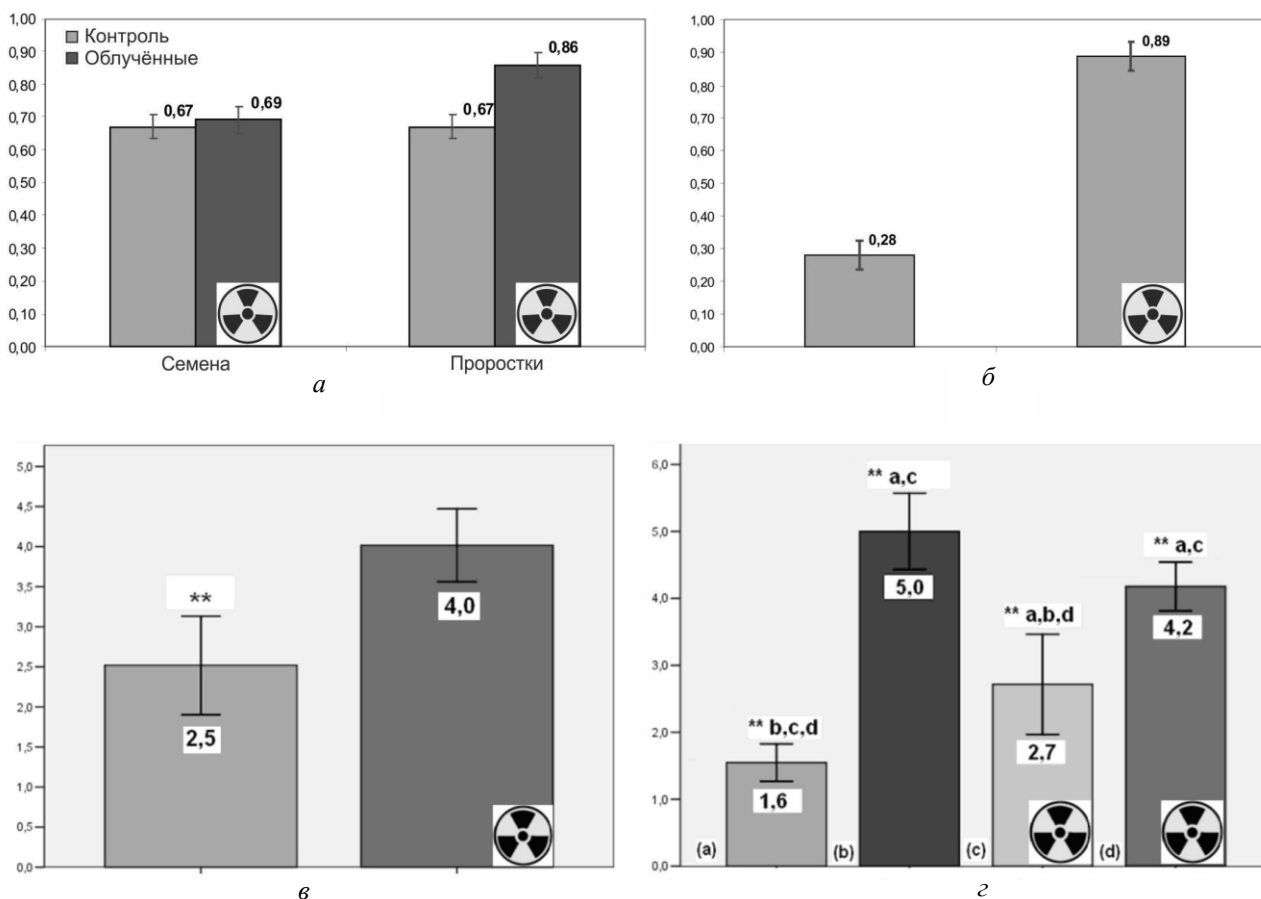


Рис. 1. Влияние хронического облучения на проростки *A. thaliana* (7-е сутки): *а* – энергия прорастания семян резуховидки Таля (доля проросших семян по отношению к количеству посеянных), $p < 0,03$; *б* – доля проростков в фазе первичной розетки среди всех проростков из контрольной (слева) и опытной (справа) группы, $p < 0,01$; *в* – средняя длина гипокотыля (мм) интактных (слева) и хронически облученных во время прорастания растений (справа), $p < 0,05$; *г* – средняя длина гипокотыля (мм) хронически облученных во время прорастания (справа) и интактных растений (слева) в зависимости от наличия у проростков листьев первичной розетки или только семядолей, $p < 0,05$ ((а) и (с) – семядоли; (б) и (д) – листья).

После удаления проростков из области действия излучения различия между опытным и контрольным вариантами быстро сходят на нет. Между взрослыми растениями расхождений в морфологических, фенотипических, вегетационных и генеративных характеристиках не наблюдается. Таким образом, хроническое облучение прорастающих семян приводит к выраженной, но кратковременной модификации ростовых процессов. Проявляется транзитивный характер воздействия на объект ионизирующего облучения в малых дозах. В то же время после облучения сухих семян различия в росте и скорости развития растений начинают проявляться не сразу, а позже, в период перехода от вегетативной фазы развития к генеративной. Растения из облученных семян зацветают раньше на 2 - 3 недели (медианное время начала цветения – 4-я неделя вегетации; медианное время начала цветения растений контрольного варианта – 6 - 7-я неделя вегетации, $p = 0,01$).

Вскоре после начала цветения на растениях из

экспериментальной группы начинают образовываться стручки. К исходу 7-й недели на стеблях *A. thaliana* из облученных семян созрело в среднем в два раза больше стручков, чем на необлученных растениях (13 и 6 соответственно, $p = 0,05$). Однако коэффициент вариации данного показателя в опытной группе выше – 1,05 (0,63 в контроле).

На рубеже стадий вегетативного и генеративного развития (5-я неделя вегетации) различия по темпам роста и длине главного стебля достигают максимального значения. Средний рост растений в опытном варианте 135 мм, в то время как в контрольном только 55 мм ($p = 0,001$). С 6-й недели развития и до конца наблюдений мы отмечали тенденцию к снижению средней скорости роста стебля – более чем в 4 раза для растений из облученных семян на 6-ю неделю вегетации по сравнению с 4 - 5-й неделями. Тем не менее в обеих группах для данного показателя отмечали аperiodические колебания. Иногда в результате временной дерегуляции поступления воды стеб-

ли растений даже несколько укорачивались (очевидно, дерегуляция поступления воды и тургора тканей стебля является возрастной особенностью). В целом значимые различия по скорости ростовых процессов наблюдаются в период между 2-й и 5-й неделями, когда растения из опытной группы резко опережают контрольные, и с 10-й по 13-ю недели, когда, наоборот, более высокая скорость роста зафиксирована в группе необлученных растений.

Переломная точка приходится на 11 - 12-ю

неделю вегетации, когда в опытном варианте межиндивидуальная вариация показателей роста и образования стручков более чем вдвое превышает аналогичную величину в контроле, появляются увядающие растения. Отсюда можно заключить, что не контрольные растения «догоняют и перегоняют», а опытные «начинают отставать». На это опять-таки указывает резкое снижение темпов роста в опытной группе по состоянию на 11 - 12-ю неделю (рис. 2, б).

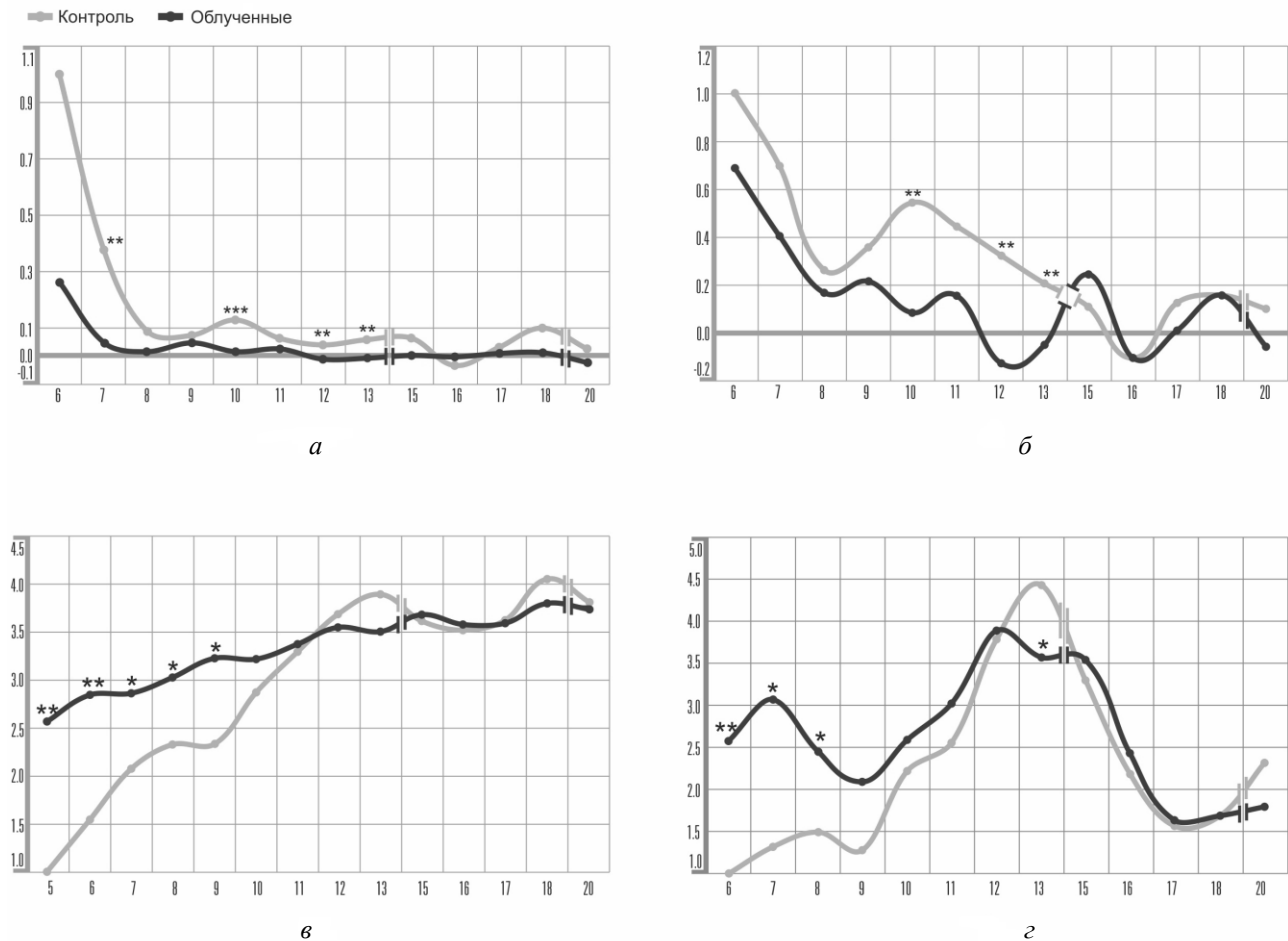


Рис. 2. Влияние хронического облучения семян *A. thaliana* на скорость роста главного стебля растений и образования стручков (по оси абсцисс на всех графиках – неделя вегетации (время от начала опыта), по оси ординат – величина соответствующего показателя в у.е.): а – динамика абсолютной скорости роста стебля растений. За единицу принята скорость роста стебля в контрольном варианте к 6-й неделе вегетации, 0,01 (**), $p = 0,001$ (***) ; б – динамика относительной скорости роста стебля растений. За единицу принята относительная скорость роста стебля в контрольном варианте к 6-й неделе вегетации, $p = 0,01$ (**); в – динамика длины стебля растений. За единицу принята средняя длина стебля растений в контрольном варианте к 5-й неделе вегетации, $p = 0,05$ (*), $p = 0,01$ (**); г – динамика количества стручков на побегах. За единицу принято среднее количество стручков на побегах в контрольном варианте к 6-й неделе вегетации. (На 14-й и 19-й неделе вегетации измерения не проводились.) $p = 0,05$ (*), $p = 0,01$ (**).

Анализ динамики длины стебля и образования стручков на побегах за полный вегетационный период позволяет сделать вывод, что выявленная тенденция не является случайной. Оба показателя в опытной группе с 6-й по 9-ю неделю превыша-

ют контрольные значения. С 10-й по 13-ю неделю средняя длина стебля в обеих группах увеличивается, но уже на фоне снижения скорости роста, а после 13-й недели выходит на плато (колебания обусловлены изменением тургора тканей).

В период с 10-й по 13-ю неделю вегетации возрастает до максимума количество образовавшихся на побегах стручков, затем до конца опыта наблюдается снижение этого показателя за счет опада (первая волна опада приходится на 8 - 9-ю неделю вегетации). Также следует отметить наличие первого пика раннего цветения и созревания стручков на растениях опытного варианта (6 - 8-я неделя вегетации), который не наблюдается в контроле.

Таким образом, с 5-й по 9-ю неделю вегетации растения из облученных семян опережают в развитии контрольные, с 10-й по 13-ю неделю эти различия выравниваются, а начиная с 14-й недели и до окончания опытов различия между вариантами сглаживаются. Отсюда можно заключить, что растения из облученных семян опережают контрольные в первой половине жизненного цикла, а именно с конца вегетативной фазы до достижения кульминации генеративной фазы развития. Опережение, проявляющееся как смещение во времени контрольных точек развития, составляет примерно 4 недели. Одним из возможных объяснений различия кривых на рис. 2, *г* может быть эпигенетическая дерегуляция экспрессии генов, ответственных за инициацию цветения и созревание плодов (см. подробнее работу [10]).

Что касается «срезанной» вершины графика количества стручков, созревших на растениях из облученных семян (см. рис. 2, *г*, 13-я неделя вегетации), то, на наш взгляд, данная особенность может быть обусловлена радиационным поражением эмбриональных инициалей генеративной меристемы второго пика цветения. Эту возможность подтверждает проведенный нами расчет на основе модели одноударного поражения мишени. Расчет массы мишени по методу Ли [11], исходя из полученных данных, дает величину около $6,9 \cdot 10^{-18}$ кг. Приведенная оценка на порядок меньше массы однонитевой геномной ДНК *A. thaliana* ($1,190 \cdot 10^8$ нт $\cdot 5,729 \cdot 10^{-25}$ кг $\approx 6,8 \times 10^{-17}$ кг). Следовательно, на одноцепочечную геномную ДНК гаплоидного набора хромосом арабидопсиса пришлось около 40 попаданий. Основной вид генетических повреждений в результате попаданий (ионизации атомов δ -электронами, возникающими в ядре под воздействием γ -излучения) – одноцепочечные разрывы ДНК. Вероятность появления двуникового разрыва как следствия прямого попадания γ -кванта или независимых попаданий в одну и ту же мишень δ -электронов, очевидно, пренебрежительно мала. Из этого мы можем заключить, что предполагаемое повреждение генеративной меристемы может быть связано с разрывами одной

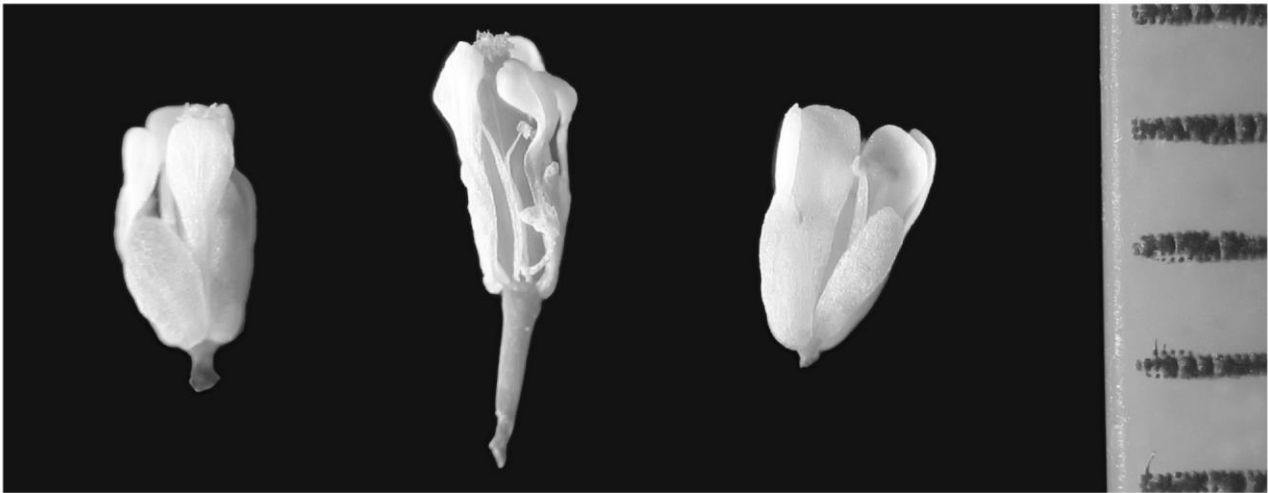
из цепей ДНК в ядрах эмбриональных клеточных инициалей. Известно, что ионизирующее излучение способно индуцировать комплексные повреждения – разрывы ДНК с химически модифицированными концами. Такого рода одноцепочечные разрывы нерепарабельны. Важно также учесть, что в метаболически неактивных клетках не работают ферментные системы репарации. Поэтому часть однонитевых разрывов может превращаться в летальные повреждения – двунитевые разрывы на этапе репликации ДНК, которая предшествует делению инициали.

Несмотря на то что морфометрические показатели контрольного и опытного вариантов во второй половине вегетативного цикла не различаются, эффект воздействия радиации в этот период не исчезает. Так, продолжительность вегетации от момента прорастания до засыхания неодинакова для растений из сравниваемых групп. Контрольные растения вегетируют дольше. Средняя продолжительность вегетации в контрольном варианте 19 недель (медианная 19,5), в опытном – 14,9 (медианная 16). Разница между вариантами (3 - 4 недели) практически не отличается от сдвига фаз кривых показателей роста и развития растений в начальном периоде, когда опытные растения опережают контрольные. Однако раннее цветение само по себе не может быть причиной преждевременного увядания, поскольку корреляция между временем начала цветения и продолжительностью вегетационного периода мала и статистически недостоверна. Продолжительность вегетации сокращается настолько же, насколько смещаются во времени контрольные точки онтогенеза – цветение и созревание стручков. Величина этого смещения составляет около 20 % длительности полного вегетационного цикла необлученных растений.

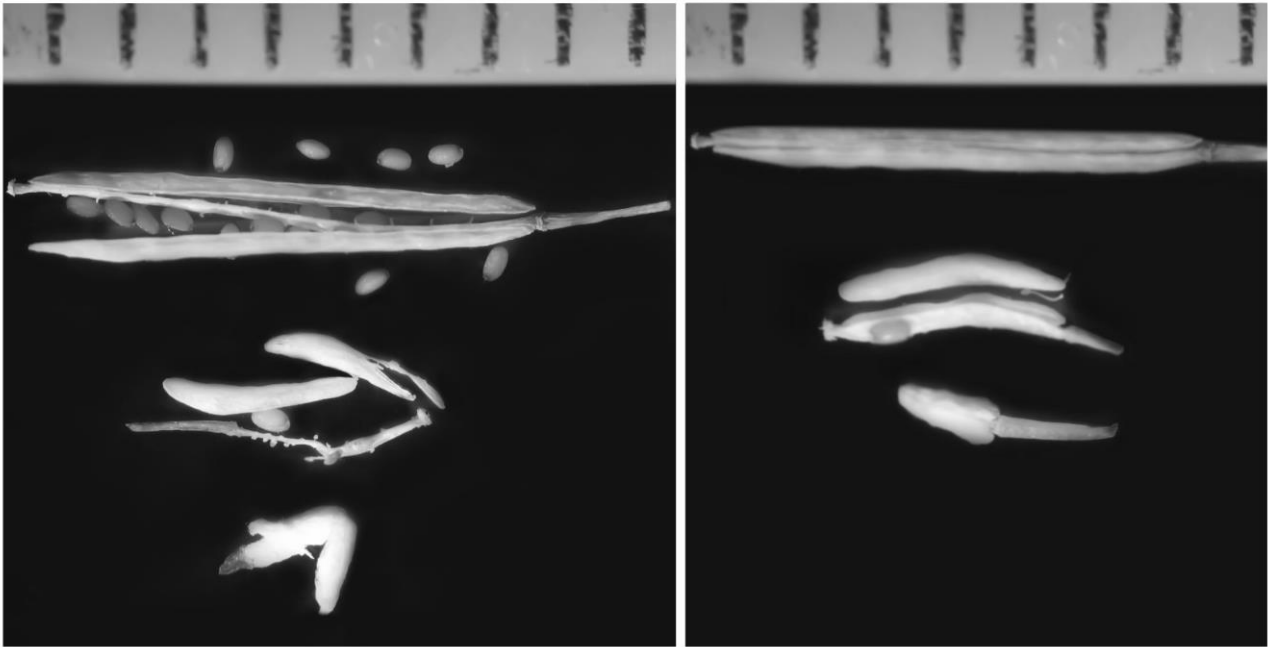
Что касается итоговых морфометрических показателей, то статистически значимые различия наблюдаются только между теми облученными и необлученными растениями, которые завершили вегетативный цикл раньше, чем остальные. Для растений, засохших раньше медианного срока вегетации, характерна меньшая сухая масса надземной части в опытном варианте по сравнению с контролем ($23 \text{ мг} < 50 \text{ мг}$, $p = 0,04$). Облученные растения также демонстрируют более низкий средний прирост сухой массы в сутки (220 мкг против 430 мкг в контроле, $p = 0,02$). Эти данные свидетельствуют об общем угнетении ассимиляционных процессов, в особенности белкового синтеза у рано засохших растений из облученных семян (примерно 2/3 сухой растительной массы составляют белки). Раньше других засыхают ингибированные расте-

ния и фенотипически нормальных растениях, то статисти-

чески значимых различий между опытной и контрольной группой мы не зафиксировали.



a



б

в

Рис. 3. Аномалии генеративных органов *A. thaliana*, часто встречающиеся у растений из облученных семян: *a* – в центре аномальный цветок растения из опытного варианта, слева и справа контроль; *б, в* – сверху нормальный стручок, ниже редуцированные стерильные стручки облученных растений.

По критерию продуктивности – общему количеству стручков, созревших за время вегетации, – статистически достоверные расхождения между опытным и контрольным вариантами отсутствуют. Но было бы неправильно утверждать, что облучение семян в малых дозах вовсе не влияет на репродуктивную сферу. Во-первых, как уже указывалось, растения в опытной группе зацветают и начинают плодоносить раньше. Во-вторых, на некоторых из них мы обнаружили цветки измененной формы с аномалиями околоцветника (рис. 3, *a*). На растениях из облученных семян после прохождения ими пика продуктив-

ности во второй половине вегетационного цикла до 10 % новообразованных стручков стерильны или частично стерильны. При этом в контроле стерильны менее 5 % стручков (однако различия между группами статистически недостоверны). Стерильные стручки меньше нормальных, могут содержать несколько мелких или необычно крупных семян, а также недоразвитые семечки (см. рис. 3, *б, в*).

Кроме аномалий генеративных органов в опытном варианте зафиксировано 6 % фенотипически аномальных растений. Их доля статистически достоверно не отличается от контроля из-за относительно не-

большой величины выборки, но характерная особенность значительной части этих фенотипических отклонений – системное нарушение формирования органов и тканей – отличает их от обычных ингибированных растений с задержкой развития из контрольной группы. Основные отмеченные нами особенности фенотипически измененных растений из опытной группы следующие:

а) изменение ростовых параметров – есть как очень большие, так и карликовые растения;

б) снятие апикального доминирования, активный рост стеблей второго порядка (симподий), причем часто эти стебли заметно тоньше, чем в контроле, особенно ближе к верхушке побега;

в) стебель тоньше, сильнее изгибается, проявляет меньший в сравнении с контролем отрицательный геотропизм (у хронически облученных проростков искривляются корни, что свидетельствует об ослаблении положительного геотропизма);

г) листья в основании розетки темнее, чем обычно, иногда имеют темно-фиолетовый оттенок;

д) для плана строения побега в целом и его частей характерна асимметрия на всех этапах развития;

е) воздействие радиации проявляется в одно и то же время у большей части растений и в одно и то же время ослабевает (сглаживается). Это говорит о детерминистском характере наблюдаемых эффектов. Также стоит отметить, что все выявленные нами фенотипические отклонения из опытной группы оказались стерильными.

Обсуждение и выводы

В проведенных нами экспериментах показано влияние малых доз хронического γ -облучения семян и проростков *A. thaliana* на онтогенез, на показатели, характеризующие рост и развитие растений. Среди обнаруженных эффектов можно назвать:

1) ускоренный рост в ранней вегетативной фазе, имеющей меньшую продолжительность по сравнению с аналогичным периодом онтогенеза контрольных растений;

2) сокращение сроков начала цветения на 2 - 3 недели (растения из облученных семян);

3) сокращение продолжительности вегетации на 3 - 4 недели при отсутствии значимых различий по сухой массе надземной части растения (растения из облученных семян);

4) появление небольшого количества растений с аномальным габитусом, который не наследуется в следующем поколении (растения из облученных семян).

В целом можно констатировать, что мы не наблюдали характерных фенотипических признаков радиационного поражения растений наряду с явно выраженной радиационной стимуляцией раннего цветения и ускоренного роста на ранних этапах развития. Следует подчеркнуть, что стимулирующий эффект облучения семян реализуется не сразу, как при хроническом облучении в процессе прорастания, а начиная с определенного момента вегетативной фазы (инициация верхушечного роста побега) до наступления ранней генеративной фазы включительно. В данном случае имеет место фазозависимое воздействие, что может свидетельствовать о роли фитогормональных факторов в реализации наблюдаемых эффектов. Поэтому уместно говорить о двойственности зафиксированных нами изменений: с одной стороны, они носят временный, транзитный характер, а с другой – «переходят» из одной фазы развития в другую, от родительского клеточного пула к дочернему постмитотическому пулу. На наш взгляд, полученные данные можно объяснить пострадиационной стимуляцией меристем в период вегетативного роста наряду с их истощением и ингибированием после прохождения пика генеративной фазы. Фазозависимость наблюдаемых эффектов позволяет предполагать наличие в организме растений сигнальных мессенджеров, передающих информацию о радиационном воздействии между клетками, тканями и органами. При этом если доза и мощность хронического облучения оказываются достаточными (30 сГр, 45 сГр/ч), то изменения в жизнедеятельности клеток облученного растения могут передаваться эпигенетически в ряду митотических клеточных поколений. Если же объект получает подпороговую дозу, то наблюдаются лишь кратковременные эффекты, которые устраняются механизмами поддержания гомеостаза на клеточном, тканевом и организменном уровнях после прекращения действия радиации. В дальнейших исследованиях следует обратить внимание на выяснение природы описанных нами онтогенетических эффектов хронического облучения малыми дозами γ -радиации, а также на изучение возможности использования данного режима облучения семенного материала с целью ускорения цветения и созревания культурных растений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Low doses of ionizing radiation: biological effects and regulatory control: Contributed papers.* - Vienna: IAEA, 1997. - 696 p.
2. Гродзинский Д.М. Радиобиология растений: монография / Отв. ред. И. Н. Гудков. - К.: Наук. думка, 1989. - 384 с.
3. Гродзинський Д.М., Гуца М.І., Дмитрієв О.П. та ін. Генотипова нестабільність і віддалені ефекти хро-

- нічного та гострого опромінення рослин // Радіобіологічні ефекти хронічного опромінення рослин у зоні впливу Чорнобильської катастрофи: монографія. - К.: Наук. думка, 2008. - С. 33 - 62.
4. Кузин А.М., Вагабова М.Э., Примак-Миролюбов В.Н. О роли естественного фона ионизирующих излучений в начальных фазах развития растений // Радиобиология. - 1977. - Т. 17, № 1. - С. 37 - 40.
 5. Focea R., Capraru-Vochita G., Creanga D., Luchian T. Effect of low dose X-rays on plant. http://www.bursedoctorale.ro/public/documente/conferinta/1347180040_articol_articol_conf_%20IBWAP_Focea_SD_Fizica_nepublicat.pdf
 6. Kurimoto T., Constable J.V., Huda A. Effects of ionizing radiation exposure on *Arabidopsis thaliana* // Health Phys. - 2010. - Vol. 99, No. 1. - P. 49 - 57.
 7. Malla B. Biological effects of low dose radiation from the cobalt-60 source at As, Norway, and of natural background radiation at the thorium-rich area in Telemark, Norway: studies with the model plant *Arabidopsis thaliana*: Master thesis. - Norwegian University of Life Sciences, 2012.
 8. Biological mechanisms of radiation actions at low doses. A white paper to guide the Scientific Committee's future programme of work. - New York: UNSCEAR, 2012. http://www.unscear.org/docs/reports/Biological_mechanisms_WP_12-57831.pdf
 9. Sokal R. Introduction to Biostatistics / Ed. by R. Sokal, J. Rohlf. - New York: Dover Publications, 2009. - 365 p.
 10. Rashydov N., Kliuchnikov O., Seniuk O. et al. Radiobiological Characterization Environment around Object "Shelter" // Nuclear Power Plant / Ed. by Soon Heung Chang. - 2012. - P. 231 - 279.
 11. Иванов В.И., Лысцов В.Н. Основы микродозиметрии. - М.: Атомиздат, 1979. - С. 105.

С. В. Літвінов

Інститут клітинної біології та генетичної інженерії НАН України, Київ

ВПЛИВ ХРОНИЧНОГО ОПРОМІНЕННЯ НАСІННЯ ТА ПРОРОСТКІВ *ARABIDOPSIS THALIANA* МАЛИМИ ДОЗАМИ γ -РАДІАЦІЇ НА РІСТ ТА РОЗВИТОК РОСЛИН

Представлено результати вивчення дії хронічного γ -опромінення в малих дозах проростків і насіння *A. thaliana* на ріст і розвиток рослин. Потужність опромінення для насіння становила 0,45 мГр/год (загальна поглинена доза 30 сГр), для проростків 0,18 мГр/год (загальна поглинена доза 3 сГр). Між дослідним і контрольним варіантами (опромінені проростки) виявлено статистично достовірні відмінності за показниками енергії проростання, часу формування первинної розетки, довжини гіпокотіля. Рослини з опроміненого насіння випереджали контрольні за швидкістю росту стебла, раніше починали квітнути та утворювати стручки, але мали в середньому більш короткий вегетативний цикл і раніше відмирили. У проведених нами експериментах показано значущий вплив малих доз хронічного γ -опромінення насіння і проростків на онтогенез *A. thaliana* на показники, що характеризують ріст і розвиток рослин.

Ключові слова: опромінення, малі дози радіації, онтогенез рослин, радіобіологічні ефекти, феномодифікація.

S. V. Litvinov

Institute of Cell Biology and Genetic Engineering, National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv

EFFECTS OF CHRONIC EXPOSURE OF SEEDS AND SEEDLINGS OF *ARABIDOPSIS THALIANA* BY LOW DOSES OF γ -RADIATION ON PLANT GROWTH AND DEVELOPMENT

Article presents the results of research on the effect of chronic γ -irradiation in small doses on *A. thaliana* seedlings and seeds growth and development. Exposure rate for the seeds was 0,45 mGy/h (total absorbed dose 30 cSv) and 0,18 mGy/h for seedlings (total absorbed dose 3 cSv). Statistically significant differences in the germination capacity, in the time of primary leaf rosette formation, in the hypocotyl length were revealed between irradiated and control seedlings. Plants from irradiated seeds differed by the higher growth rate of stem, they flowered and fruited earlier, but they also characterized on average shorter vegetative cycle in comparison with control plants. In our experiments it is shown epy significant impact of chronic low doses of γ -irradiation of seeds and seedlings on the ontogeny in *A. thaliana* and on the parameters that reflect the growth and development of the irradiated plants.

Keywords: chronic exposure, low dose radiation, ontogeny of plants, radiobiological effects, phenomodification.

REFERENCES

1. Low doses of ionizing radiation: biological effects and regulatory control: Contributed papers. - Vienna: IAEA, 1997. - 696 p.
2. Grodzinskij D.M. Radiobiology of plants: Monograph / Ed. by I. N. Gudkov. - Kyiv: Nauk. dumka, 1989. - 384 p. (Rus)
3. Grodzyns'kyi D.M., Gushcha M.I., Dmytriyev O.P. et al. // Radiobiological effects of plants chronic exposure in the Chernobyl disaster area: Monograph / - Kyiv: Nauk. dumka, 2008. - P. 33 - 62. (Ukr)
4. Kuzin A.M., Vagabova M.E., Primak-Mirolyubov V.N. // Radiobiologiya. - 1977. - Vol. 17, No. 1. - P. 37 - 40. (Rus)

5. *Focea R., Capraru-Vochita G., Creanga D., Luchian T.* Effect of low dose X-rays on plant. http://www.bursedoctorale.ro/public/documente/conferinta/1347180040_articol_articol_conf_%20IBWAP_Focea_SD_Fizica_nepublicat.pdf
6. *Kurimoto T., Constable J.V., Huda A.* Effects of ionizing radiation exposure on *Arabidopsis thaliana* // *Health Phys.* - 2010. - Vol. 99, No. 1. - P. 49 - 57.
7. *Malla B.* Biological effects of low dose radiation from the cobalt-60 source at As, Norway, and of natural background radiation at the thorium-rich area in Telemark, Norway: studies with the model plant *Arabidopsis thaliana*: Master thesis. - Norwegian University of Life Sciences, 2012.
8. *Biological mechanisms of radiation actions at low doses.* A white paper to guide the Scientific Committee's future programme of work. - New York: UNSCEAR, 2012. http://www.unscear.org/docs/reports/Biological_mechanisms_WP_12-57831.pdf
9. *Sokal R.* Introduction to Biostatistics / Ed. by R. Sokal, J. Rohlf. - New York: Dover Publications, 2009. - 365 p.
10. *Rashydov N., Kliuchnikov O., Seniuk O. et al.* Radiobiological Characterization Environment Around Object "Shelter" // Nuclear Power Plant / Ed. by Soon Heung Chang. - 2012. - P. 231 - 279.
11. *Ivanov V.I., Lystsov V.N.* Basics microdosimetry. - Moskva: Atomizdat, 1979. - P. 105. (Rus)

Надійшла 08.09.2014

Received 08.09.2014