

ВЛИЯНИЕ ГАММА-ИЗЛУЧЕНИЯ В МАЛЫХ ДОЗАХ НА РАЗВИТИЕ РАСТЕНИЙ ИЗ ОБЛУЧЕННЫХ ПРОРОСТКОВ *PISUM SATIVUM* В ЛАБОРАТОРНЫХ ЭКСПЕРИМЕНТАХ

А.Я. Болсуновский, доктор биологических наук, главный научный сотрудник

Е.А. Трофимова, младший научный сотрудник

О.П. Орешникова, младший научный сотрудник

Институт биофизики СО РАН, Федеральный исследовательский центр «Красноярский научный центр СО РАН», Красноярск, Россия

E-mail: radecology@gmail.com

Ключевые слова: горох, гамма-облучение, малые дозы облучения, морфометрические параметры, угнетение роста.

Реферат. Проблема радиационного облучения организмов актуальна для территорий, где размещены предприятия атомной отрасли. Для биотестирования техногенных факторов воздействия на окружающую среду, включая радиационный фактор, широко используются растительные биотесты. Ранее была показана чувствительность ростовых и цитогенетических параметров биотеста на основе *Pisum sativum* к действию гамма-облучения, но только в высоких дозах. Целью данной работы являлась оценка влияния гамма-облучения в малых дозах на развитие *Pisum sativum* в течение 6–10 дней после облучения проростков. В экспериментах использовали семена гороха посевного сорта Радомир из коллекции лаборатории селекции гороха КрасНИИСХ ФИЦ «Красноярский научный центр СО РАН». Проростки гороха облучали источником ^{137}Cs в течение 24 и 72 ч, при этом поглощенная доза составила 20 и 62 мГр. После облучения проростки подращивали в климатической камере на гидропонике на протяжении 10 дней (240 ч). Контролем служили необлученные проростки, которые подращивали в идентичных с облученными условиях. В проведенных экспериментах впервые получены достоверные данные о негативных эффектах влияния гамма-облучения (20 и 62 мГр) на развитие гороха посевного спустя 6–10 дней после облучения. Выявлено негативное влияние гамма-облучения на рост основного и боковых корней молодых растений. В экспериментах с облучением проростков гороха подтвержден ранее известный факт, что корни растений являются более чувствительным параметром к облучению по сравнению с побегами. Характер изменения длины основного корня гороха от времени проращивания при дозе 20 мГр описывается линейным уравнением, а для более высокой дозы облучения 62 мГр данные могут быть аппроксимированы логарифмическим уравнением с насыщением. Разный характер зависимости длины корня от времени подращивания после облучения показывает возможную тенденцию роста растения при различных дозах облучения и времени подращивания.

THE EFFECT OF LOW-DOSE GAMMA RADIATION ON THE DEVELOPMENT OF PLANTS FROM IRRADIATED *PISUM SATIVUM* SPROUTS IN LABORATORY EXPERIMENTS

A.Ya. Bolsunovsky, Doctor of Biological Sciences, Senior Researcher

E.A. Trofimova, Junior Researcher

O.P. Oreshnikova, Junior Researcher

Institute of Biophysics SB RAS, Federal Research Center Krasnoyarsk Scientific Center SB RAS, Krasnoyarsk, Russia

Email: radecology@gmail.com

Keywords: peas, gamma irradiation, low doses of irradiation, morphometric parameters, growth suppression.

Abstract. The problem of radiation exposure to organisms is relevant for areas where nuclear industry enterprises are located. Plant biotests are widely used for biotesting of anthropogenic factors affecting the environment, including radiation. The sensitivity of growth and cytogenetic parameters of the biotest based on *Pisum sativum* to the action of gamma irradiation has been shown before, but only at high doses. The purpose of this work was to evaluate the influence of low-dose gamma irradiation on the development of *Pisum sativum* over 6–10 days after irradiating the sprouts. In the experiments, seeds of the Radomir sowing variety from the

collection of the pea breeding laboratory of Krasnoyarsk Research Institute of Agriculture - Federal Research Centre Krasnoyarsk Scientific Center SB RAS were used. Pea sprouts were irradiated with a ^{137}Cs source for 24 and 72 hours, with the absorbed dose being 20 and 62 mGy. After irradiation, the sprouts were grown in a climatic chamber on hydroponics for 10 days (240 hours). The control consisted of non-irradiated sprouts grown under identical conditions. The experiments for the first time provided reliable data on the negative effects of gamma irradiation (20 and 62 mGy) on the development of sowing peas 6-10 days after irradiation. A negative effect of gamma irradiation on the growth of the main and lateral roots of young plants was revealed. The experiments with irradiated pea sprouts confirmed the previously known fact that plant roots are more sensitive to irradiation compared to shoots. The pattern of change in the length of the main root of peas over time during germination at a dose of 20 mGy is described by a linear equation, while for a higher dose of irradiation, 62 mGy, the data can be approximated by a logarithmic equation with saturation. The different character of root length dependence on the time of cultivation after irradiation indicates a possible trend in plant growth under various doses of irradiation and cultivation times.

Ионизирующее излучение является одним из факторов, влияющих на глобальном уровне на здоровье людей и окружающую среду. В документах Международной комиссии по радиационной защите [1] и публикациях ряда авторов [2–4] отмечается разная чувствительность растений и животных к радиационному фактору. Общепринято, что растения обладают низкой радиочувствительностью по сравнению с животными. Однако в обзоре литературных данных по радиочувствительности [3, 5–7] отмечено существование видов растений, цитогенетические и биохимические параметры которых в ответ на дозы облучения не уступают животным.

Проблема радиационного облучения организмов окружающей среды актуальна для многих регионов России, в том числе для Красноярского края, где длительное время работает Горно-химический комбинат Росатома (ГХК). Аэрозольные и водные поступления техногенных радионуклидов с ГХК привели к радиационному загрязнению окружающей среды и особенно поймы реки Енисей [8–10]. Ранее нами выявлен повышенный уровень хромосомных нарушений в ана-телофазных клетках корневой меристемы водного растения *Elodea canadensis*, вегетирующего в районах повышенного радиационного загрязнения р. Енисей, а также при биотестировании донных отложений из этих районов в лабораторных экспериментах [11, 12]. Использование нами ранее лукового биотеста (*Allium*-test) показало чувствительность ростовых и цитогенетических параметров репчатого лука к малым дозам облучения (менее 100 мГр) в лабораторных экспериментах [13–15].

Для биотестирования техногенных факторов окружающей среды используются и другие растительные биотесты. Горох (*Pisum sativum* L.) является не только одной из главных зернобобовых культур в мире, но и используется для биотестирования химических и радиационных факторов. В работах [16–18] показана чувствительность ростовых и цитогенетических параметров биотеста на основе гороха *Pisum sativum* к действию химических веществ, а также разного типа ионизирующему излучению. Однако в вышеотмеченных работах облучение семян и проростков гороха проводили с использованием доз в интервале от 1 до 1000 Грей [16–18], что многократно превышало малые дозы облучения (менее 100 мГр).

Цель исследований – оценить влияние гамма-облучения проростков *Pisum sativum* в малых дозах на развитие растений в течение 6–10 дней после облучения.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

В эксперименте использовали семена гороха листочкового морфотипа сорта Радомир из коллекции лаборатории селекции гороха КрасНИИСХ ФИЦ «Красноярский научный центр СО РАН». Ранее этот сорт хорошо проявил себя при выращивании на территории Восточной Сибири и в экспериментах с использованием стимуляторов роста [19–20].

После получения из КрасНИИСХ и до проведения эксперимента семена хранились в холодильнике в бумажных пакетах при постоянной температуре 4 °С. За сутки до начала эксперимента семена гороха закладывали на проращивание, по 150 семян для каждого

эксперимента. Предварительно семена обрабатывали раствором «Фитоспорин-М Рассада» (БашИнком) для профилактики развития плесневых грибов во время проращивания и облучения. Затем семена раскладывали по трем полипропиленовым контейнерам ($d = 129$ мм, $h = 46$ мм) по 50 шт. на контейнер между слоями фильтровальной бумаги, увлажнённой дистиллированной водой. Контейнеры помещали в инкубатор Sanyo MIR-254 (Panasonic, Япония) с постоянной температурой $21\text{ }^{\circ}\text{C}$, вентиляцией и без освещения. Всхожесть оценивали на восьмые сутки проращивания согласно ГОСТ 12038–84, она составила $85,8 \pm 1,4$.

На рис. 1 приведена схема эксперимента по облучению проростков гороха источником ^{137}Cs с активностью 10 МБк. Было проведено два варианта эксперимента с разной длительностью облучения тест-объекта: 24 ч (эксперимент № 1) и 72 ч (эксперимент № 2). Для облучения проростки раскладывали в два полипропиленовых контейнера ($d = 135$ мм, $h = 25$ мм) на ложе из двух слоев фильтровальной бумаги, смоченной в дистиллированной воде, по кругу радиусом

3,5 см (см. рис. 1, а). Между двумя контейнерами в центре конструкции, как показано на рис. 1, б, помещали радиоактивный источник. Мощность дозы облучения определялась расстоянием проростков от радиоактивного источника и была проверена прямым измерением дозиметром (ДКГ-02У, НПП «Доза», Россия). В экспериментах мощность дозы составила $0,9$ мГр/ч. В эксперименте № 1 поглощённая доза для растений составила 20 мГр, в эксперименте № 2 при длительности облучения растений 72 ч поглощённая доза – 62 мГр. Поглощённая доза для контрольных растений соответствовала фоновому уровню облучения – около $0,01$ мГр. Облучение проводили в инкубаторе в темноте при температуре $21\text{ }^{\circ}\text{C}$ в течение 24 и 72 ч. Контролем служили необлученные проростки, которые культивировали в идентичных с облученными проростками условиях. Всего для эксперимента № 1 было использовано по 25 проростков с длиной первичного корня 3–4 мм для контроля и облучения; для эксперимента № 2 – по 40 проростков с длиной корня 5–6 мм для контроля и облучения.

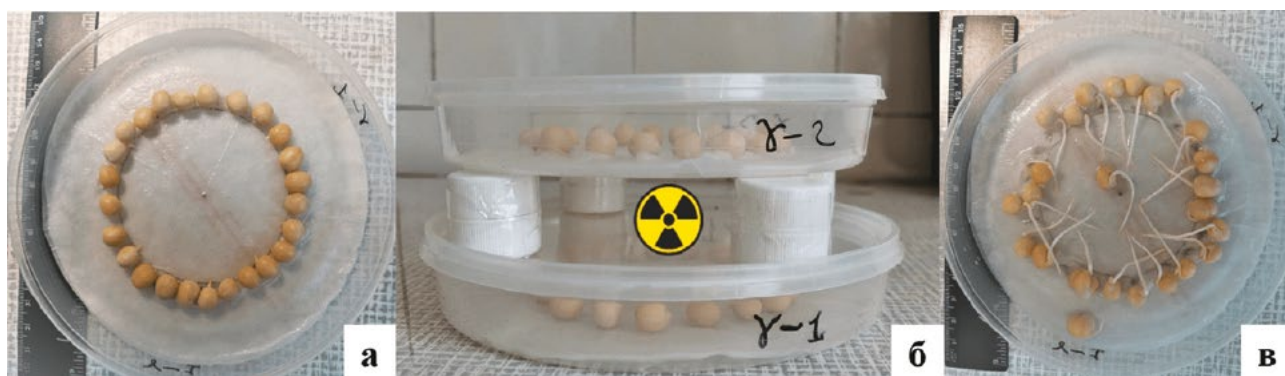


Рис. 1. Схема эксперимента по облучению *Pisum sativum*: а – расположение проростков внутри контейнера; б – конструкция из контейнеров с проростками, значком отмечено расположение радиоактивного источника ^{137}Cs ; в – внешний вид проростков сразу после облучения в течение 24 ч

Experimental setup for irradiating Pisum sativum. a - arrangement of sprouts inside the container; b - structure of containers with sprouts, the location of the radioactive source ^{137}Cs is marked with a symbol; c - external appearance of sprouts immediately after 24 hours of irradiation

После облучения растения переносились в цилиндрические пластиковые контейнеры объемом 700 мл (рис. 2, а), заполненные 630 мл среды Кнопа, с постоянной аэрацией. В эксперименте № 1 для контроля и облучения было использовано по 3 контейнера, в каждый из них было высажено по 8 проростков. В эксперименте № 2 использовали 4 контейнера на уровень по 9–10 проростков в каждый. Кон-

тейнеры с проростками выдерживали в климатической комнате при верхнем освещении люминесцентными лампами, Е 3,8–4,1 клк на поверхности контейнеров, с фотопериодом 16 : 8 (день : ночь), при температуре воздуха $24 \pm 3\text{ }^{\circ}\text{C}$. На протяжении всего периода проращивания раз в 3–4 дня в контейнеры с растениями доливалась свежая среда Кнопа до исходного объема (630 мл).



Рис. 2. Расположение контейнеров в климатической комнате и внешний вид растений *Pisum sativum* во время подращивания после облучения: а – сразу после завершения облучения; б – в конце подращивания 240 ч; в – *P. sativum*, выросшие из облученных проростков корней эксперимента, 240 ч

Placement of containers in the climatic room and appearance of *Pisum sativum* plants during cultivation after irradiation: a - immediately after the completion of irradiation; b - at the end of cultivation, 240 hours; c - *P. sativum* grown from irradiated root sprouts after 240 hours of the experiment

Проростки гороха подращивали на гидропонике (см. рис. 2, б, в) до возраста 10 дней (240 ч). Во время подращивания у растений измерялись морфометрические параметры: в возрасте 24 и 72 ч (сразу после облучения), 144 и 240 ч. В качестве индикаторов радиационного повреждения использовали длину основного корня, длину самого длинного бокового корня. Поскольку не представлялось возможным промерять длину всех боковых корней на каждом растении из-за их обильного развития, было принято решение у каждого растения визуально найти самый длинный боковой корень и измерять его длину. Также у растений измерялась длина побегов и длина междоузлий.

Полученные экспериментальные данные анализировали методами вариационной статистики с использованием пакета STATISTICA 10.0 и Excel для Microsoft Office 2013. Нормальность распределения в выборках оценивали с помощью теста Шапиро–Уилка. Значимость влияния радиационного фактора на изменение морфометрических параметров растений *P. sativum* оценивали с помощью однофакторного анализа ANOVA с последующим анализом HSD (Tukey HSD for unequal N). В табл. 1, 2 и на рис. 3 представлены средние значения и их стандартные отклонения.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В эксперименте № 1 поглощенная доза для проростков гороха составила 20 мГр (длитель-

ность облучения 24 ч). Как следует из данных табл. 1, гамма-облучение не повлияло на пролонгацию междоузлий побегов гороха и, следовательно, на дальнейший рост самих побегов на протяжении всего эксперимента до 240 ч. Значения средней длины основного корня в точке 24 ч (сразу после облучения) у облученных и контрольных растений были на одном уровне. Однако в точках 144 и 240 ч подращивания наблюдалось достоверное снижение длины основного корня облученных растений относительно контроля ($F = 16, p = 0,0003$ и $F = 32, p = 0,0001$ соответственно). В конце эксперимента (точка 240 ч) средняя длина бокового корня у облученных растений также была достоверно меньше значений этого параметра в контроле ($F = 35, p = 0,0001$).

В эксперименте № 2 поглощенная доза для проростков гороха составила 62 мГр за время облучения 72 ч. Более длительный период гамма-облучения не оказал статистически значимого эффекта на изменение длины междоузлий и длины побегов у облученных растений гороха в течение всего времени подращивания (см. табл. 2). После завершения облучения (точка 72 ч) были получены одинаковые значения средней длины основного корня у облученных и контрольных растений. В следующих временных точках 144 и 240 ч наблюдалось статистически значимое снижение длины как основного ($F = 7,4, p = 0,008$ и $F = 22, p = 0,0001$ соответственно), так и бокового корня ($F = 9, p = 0,004$ и $F = 18, p = 0,0001$ соответственно) у облученных растений относительно контроля.

Таблица 1

Влияние гамма-излучения на изменение морфометрических параметров растений *P. sativum* после облучения проростков 24 ч в эксперименте № 1

The effect of gamma radiation on changes in the morphometric parameters of *P. sativum* plants after 24 hours of sprout irradiation in Experiment 1.

Уровень воздействия	Время подрашивания, ч	Длина побегов, мм	Длина корней, мм		Длина междоузлий, мм		
			Основной	Боковой	1	2	3
Контроль	24	–	3,1±0,5	–	–	–	–
Гамма-облуч.		–	3,2±0,4	–	–	–	–
Контроль	144	7,7±2,5	19,1±3,0	8,1±1,7	2,7±0,9	3,0±0,6	1,3±0,4
Гамма-облуч.		7,6±1,2	14,6±3,9*	7,6±1,0	2,5±0,8	2,6±0,9	1,0±0,4
Контроль	240	15,0±3,1	25,2±3,3	24,9±3,4	2,7±0,8	3,4±1,2	4,4±1,3
Гамма-облуч.		16,0±1,7	19,5±2,4*	18,9±2,4*	2,5±0,6	3,3±0,8	5,2±1,0

* Статистически значимое отличие от контрольного уровня ($p < 0,05$).

* Statistically significant difference from the control level ($p < 0.05$).

Таким образом, по результатам экспериментов № 1 и 2 видно, что облучение проростков гороха в обоих вариантах малых доз негативно сказывается на развитии их корневой системы. Эффект ингибирования роста корней проявляется уже на 144 ч подрашивания после облучения в максимальной дозе. Однако сразу после окончания облучения, даже при максимальной длительности в 72 ч, средняя длина основного корня у облученных проростков не отличалась от контрольной. Сходная картина наблюдалась в экспериментах по облучению

проростков лука как в малых дозах от 10 до 70 мГр при длительности облучения 24 и 48 ч [15], так и в дозах 0,02–13 Гр при облучении 24 ч [13, 14]. Это может указывать на снижение пролиферативной активности клеток корневой меристемы под действием гамма-излучения. Пролонгация корня еще может продолжаться некоторое время за счет растяжения клеток, но переход новых клеток в зону растяжения корня замедлен, это со временем отразится на росте корня, что и наблюдается в данном случае.

Таблица 2

Влияние гамма-излучения на изменение морфометрических параметров растений *P. sativum* после облучения проростков 72 ч в эксперименте № 2

The effect of gamma radiation on changes in the morphometric parameters of *P. sativum* plants after 72 hours of sprout irradiation in Experiment 2

Уровень воздействия	Время подрашивания, ч	Длина побегов, мм	Длина корней, мм		Длина междоузлий, мм		
			Основной	Боковой	1	2	3
Контроль	72	1,3±0,6	8,2±1,2	–	–	–	–
Гамма-облуч.		1,4±0,7	8,1±1,1	–	–	–	–
Контроль	144	3,3±0,8	12,9±3,0	4,8±0,6	–	–	–
Гамма-облуч.		3,2±0,8	10,3±2,7*	4,4±0,6*	–	–	–
Контроль	240	14,6±2,0	16,8±3,8	16,7±3,8	2,6±0,6	3,4±0,5	4,3±0,6
Гамма-облуч.		15,0±1,8	11,7±3,2*	13,4±1,8*	2,6±0,7	3,4±0,7	4,6±0,7

* Статистически значимое отличие от контрольного уровня ($p < 0,05$).

* Statistically significant difference from the control level ($p < 0.05$).

Следует отметить, что ни в одном из вариантов эксперимента не было получено статистически значимого эффекта гамма-облучения на рост побегов гороха. Следовательно, при

облучении в малых дозах (20 и 62 мГр), наблюдается эффект ингибирования роста только для корневой системы гороха. Ранее при гамма-облучении побегов элодеи и проростков лука было

показано, что корни растений имеют большую чувствительность к облучению по сравнению с побегами [12, 14].

В проведенных экспериментах № 1 и 2 мы использовали всего две дозы облучения: 20 и 62 мГр соответственно. Для того чтобы оценить в полной мере дозовые эффекты облучения на морфометрические параметры гороха, необходимы данные по широкому диапазону поглощенных доз. В нашем случае только для двух доз облучения мы можем оценить возможную зависимость длины основного корня от времени дальнейшего подращивания после облучения. Как видно из рис. 3, в интервале времени до 144 ч отсутствуют достоверные отличия между длинами основного корня в зависимости от дозы облучения. Однако в точке 240 ч длина основного корня при дозе облуче-

ния 62 мГр существенно меньше длины корня при дозе 20 мГр. Для описания роста основного корня при поглощенной дозе 20 мГр подходит линейное уравнение ($R^2 = 0,97$), процесс роста идет с постоянной во времени скоростью. Для растений, облученных дозой 62 мГр, процесс роста основного корня более точно описывает логарифмическое уравнение ($R^2 = 1,0$), что указывает на замедление темпа роста со временем. Но нужно отметить, что рост корневой системы не останавливается даже у растений, получивших максимальную дозу при длительном времени облучения. В дальнейшем необходимо проводить такие эксперименты как с более широким диапазоном доз облучения, так и с более длительным временем выращивания растений после облучения.

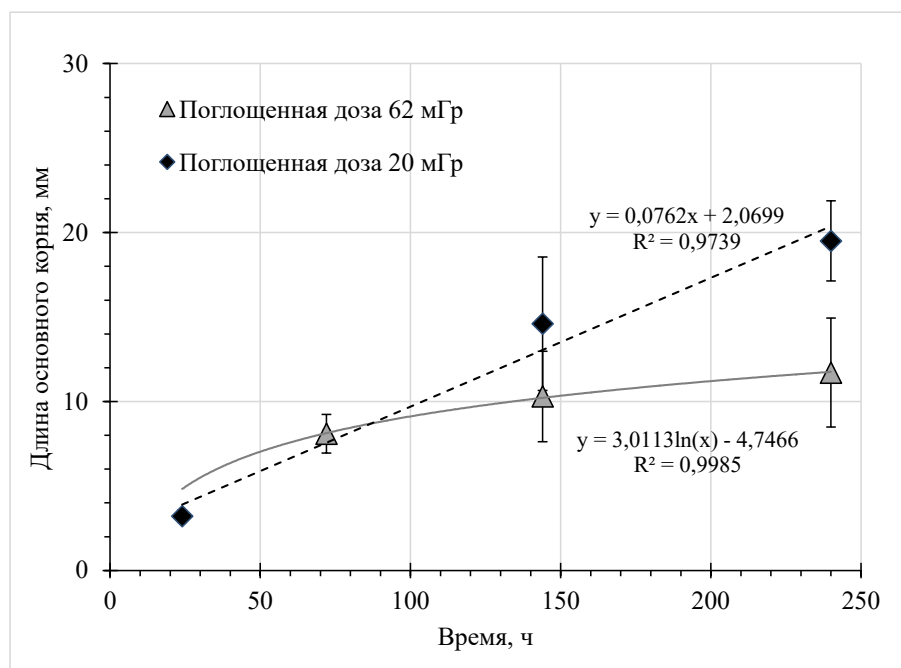


Рис. 3. Изменение длины основного корня гороха в зависимости от дозы облучения и возраста растений

Changes in the length of the main root of peas depending on the radiation dose and the age of the plants

Ранее в работе [18] Е.А. Кравец с соавторами оценивали влияние гамма-облучения на цитогенетические и морфометрические показатели гороха после подращивания в течение 8–14 дней. Исследователи использовали высокие дозы облучения: от 2 до 20 Гр, что в сто и более раз превышало дозы облучения, которые применяли мы в своей работе. В [18] показано, что частота aberrантных анафаз превышает контрольный уровень уже при дозе 2 Гр, в то время как угнетение роста побегов и корней

начинается при дозах 4–6 Гр. При дозах облучения 8 Гр и выше происходила остановка роста побегов и корней [18]. Эти исследования показали, что цитогенетические параметры развития гороха чувствительнее к гамма-облучению, чем морфометрические. Этот вывод также был подтвержден в работе [17], где регистрировали повышенный уровень хромосомных нарушений и микроядер клеток гороха при дозе облучения 0,4 Гр (400 мГр), а угнетение фитомассы наблюдали при дозе облучения 10 Гр и

росте растений в течение 96 сут. В обзоре [16] повышенный уровень хромосомных нарушений клеток гороха отмечается при дозах гамма-облучения 30 Гр и выше.

Анализ приведенных выше и других работ по эффектам гамма-облучения на морфометрические показатели гороха свидетельствует, что отсутствуют данные по радиобиологическим эффектам в области официальных малых доз облучения – 100 мГр. В работе [17] дозы облучения как минимум в несколько раз выше официальных малых доз. В проведенных нами исследованиях впервые получены достоверные эффекты влияния гамма-облучения на морфометрические параметры гороха при малых дозах 20 и 62 мГр (см. табл. 1 и 2).

В заключительной части обзора [16] указывают, что биотест на основе *Pisum sativum* по цитогенетической чувствительности к действию химических и других факторов окружающей среды уступает луковому биотесту (*Allium cepa*). В работе [15] А.В. Зуева и соавторы отмечают, что возрастание доли аберрантных клеток проростков лука (*A. cepa*) с нарушениями разных типов проявилось спустя 24 ч при малых дозах 20 мГр и выше, а угнетение роста корней наблюдали только спустя 48 ч при малой дозе облучения 140 мГр. Е.А. Трофимова и соавторы в работе [14] отмечают угнетение роста корней лука при малой дозе облучения 100 мГр спустя 6 и 10 дней после облучения. В проведенных нами исследованиях эффекты влияния гамма-облучения на рост гороха при дозах 20 и 62 мГр соответствуют вышеотмеченным данным по пороговым дозам для роста корней лука (100–140 мГр) [14, 15]. Наши данные по близкой сравнительной чувствительности биотестов на основе гороха и лука к гамма-облучению не согласуются с выводами обзора [16] о преимуществах лукового биотеста.

В работах [6, 18] отмечали существование различных аномалий развития растений после облучения высокими дозами. В наших экспериментах по облучению гороха малыми дозами и развитию облученных растений регистрировали единичные аномалии, такие как формирование второго побега и дополнительных видоизмененных листьев: усов, развивающихся на прилистниках. Для гороха сорта Радомир, являющегося листочковым,

нехарактерно развитие усатого типа листа, поэтому данное проявление может представлять интерес для селекционеров. Также у некоторых образцов было отмечено уменьшение размеров обоих или одного прилистника либо изменение их формы. В контрольных условиях подобные отклонения от нормы отмечены не были. В дальнейших экспериментах при увеличении дозы облучения и времени подращивания растений следует обратить внимание на появление подобных аномалий.

ВЫВОДЫ

1. В проведенных лабораторных экспериментах впервые получены достоверные негативные эффекты влияния гамма-облучения проростков *Pisum sativum* в малых дозах (20 и 62 мГр) на развитие растений спустя 6–10 дней после облучения. Среди морфометрических параметров гороха негативное влияние гамма-облучения показано на рост основного и боковых корней. В экспериментах с облучением проростков гороха подтвержден ранее известный факт, что корни являются более чувствительным параметром к облучению по сравнению с побегами.

2. Характер изменения длины основного корня гороха от времени проращивания при дозе 20 мГр описывается линейным уравнением, а для более высокой дозы облучения 62 мГр данные могут быть аппроксимированы логарифмическим уравнением с насыщением. Разный характер зависимости длины корня от времени подращивания после облучения показывает возможную тенденцию роста растения при разных дозах облучения и времени подращивания.

3. Полученные нами эффекты влияния гамма-облучения на рост корневой системы гороха при малых дозах соответствуют опубликованным данным по пороговым дозам для роста корней лука (*Allium cepa*), широко используемого в биотестировании. Следовательно, чувствительность *Pisum sativum* к малым дозам гамма-облучения потенциально делает его пригодным в качестве тест-объекта для проведения исследований ионизирующего излучения.

Авторы благодарят старшего научного сотрудника лаборатории радиоэкологии ИБФ ФИЦ «Красноярский

научный центр СО РАН», канд. биол. наук Д.В. Дементьева за помощь в проведении работ по гамма-облучению проростков гороха.

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ (проект № FWES-2024-0024).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *ICRP*, 2009. Environmental Protection: the Concept and Use of Reference Animals and Plants. International Commission on Radiological Protection (ICRP) Publication 108. Approved by the Commission in October 2008. Published by Elsevier Ltd, 2009. – 242 p.
2. *UNSCEAR* 2000. Sources and Effects of Ionizing Radiation. United Nations. Report to the General Assembly, with Scientific Annexes. Vol. II: Effects. Annex G. Biological effects at low radiation doses. United Nations. New York, 2000. – P. 75–161.
3. Low doses of gamma-radiation induce nonlinear dose responses in mammalian and plant cells / S.I. Zaichkina, O.M. Rozanova, G.F. Aptikaeva [et al.] // Nonlinearity in biology, toxicology, medicine. – 2004. – Vol. 2 (3). – P. 213–221.
4. Актуальная радиобиология / Л.А. Ильин, Л.М. Рождественский, А.Н. Котеров [и др.]. – М., 2015. – 240 с.
5. Effect of gamma radiation on morphological, biochemical, and physiological aspects of plants and plant product / S. Jan, T. Parween, T.O. Siddiqi, Mahmooduzzafar // Environ. Rev. – 2012. – Vol. 20. – P. 17–39.
6. Effect of ionizing radiation on physiological and molecular processes in plants / S.V. Gudkov, M.A. Grinberg, V. Sukhov, V. Vodenev // Journal of Environmental Radioactivity. – 2019. – Vol. 202. – P. 8–24.
7. Non-linear dose response of a few plant taxa to acute gamma radiation / J.T. George, B.B. Patel, V.A. Rane [et al.] // Cytologia. – 2014. – Vol. 79 (1). – P. 103–109.
8. Radioactive contamination of the Yenisei River / S.M. Vakulovsky, I.I. Kryshev, A.I. Nikitin [et al.] // Journal of Environmental Radioactivity. – 1995. – Vol. 29. – P. 225–236.
9. Bolsunovsky A. Artificial radionuclides in sediment of the Yenisei River // Chemistry and Ecology. – 2010. – Vol. 26 (6). – P. 401–409.
10. Закономерности распределения и миграции радионуклидов в долине реки Енисей / Ф.В. Сухоруков, А.Г. Дегерменджи, В.М. Белолипецкий [и др.]. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, филиал «Гео», 2004. – 286 с.
11. Bolsunovsky A., Dementyev D., Trofimova E. Biomonitoring of radioactive contamination of the Yenisei River using aquatic plants // Journal of Environmental Radioactivity. – 2020. – Vol. 211, Art. No. 106100.
12. Use of the aquatic plant *Elodea canadensis* to assess toxicity and genotoxicity of Yenisei River sediments / T.A. Zotina, E.A. Trofimova, M.Yu. Medvedeva [et al.] // Environmental Toxicology and Chemistry. – 2015. – Vol. 34. – P. 2310–2321.
13. Chromosomal aberrations and micronuclei induced in onion (*Allium cepa*) by gamma-radiation / A.Y. Bolsunovsky, D.V. Dementyev, E.A. Trofimova [et al.] // Journal of environmental radioactivity. – 2019. – Vol. 207. – P. 1–6.
14. Трофимова Е.А., Дементьев Д.В., Болсуновский А.Я. Влияние γ -излучения на развитие растений из облученных семян и проростков *Allium cepa* L. // Радиационная биология. Радиоэкология. – 2019. – № 59 (3). – С. 293–299.
15. Действие гамма-излучения в малых дозах на цитогенетические параметры проростков семян лука *Allium cepa* в экспериментах разной длительности / А.В. Зуева, Е.А. Трофимова, Д.В. Дементьев, А.Я. Болсуновский // Радиационная биология. Радиоэкология. – 2021. – № 61 (2). – С. 180–188.
16. Grant W.F., Owens E.T. Chromosome aberration assays in *Pisum* for the study of environmental mutagens // Mutation Research. – 2001. – Vol. 488. – P. 93–118.
17. Zaka R., Chenal C., Misset M.T. Study of external low irradiation dose effects on induction of chromosome aberrations in *Pisum sativum* root tip meristem // Mutation Research. – 2002. – Vol. 517 (1–2). – P. 87–99.
18. Критический уровень радиационного повреждения апикальной меристемы корня и механизмы ее восстановления у *Pisum sativum* L. / Е.А. Кравец, А.Н. Михеев, Л.Г. Овсянникова, Д.М. Гродзинский // Цитология и генетика. – 2011. – № 1. – С. 24–34.
19. Орешникова О.П., Кожухова Е.В. Энергия прорастания и всхожесть разных морфотипов гороха при обработке стимулятором роста // Вестник НГАУ (Новосибирский государственный аграрный университет). – 2021. – № 2 (59). – С. 53–61.

20. Кожухова Е.В., Орешникова О.П. Продолжительность вегетационного периода коллекционных образцов гороха в Восточной Сибири // Вестник НГАУ (Новосибирский государственный аграрный университет). – 2022. – № 1 (62). – С. 37–45.

REFERENCES

1. ICRP, 2009. Environmental Protection: the Concept and Use of Reference Animals and Plants. International Commission on Radiological Protection (ICRP) Publication 108. Approved by the Commission in October 2008. Published by Elsevier Ltd, 2009, 242 p.
2. UNSCEAR 2000. Sources and Effects of Ionizing Radiation. United Nations. Report to the General Assembly, with Scientific Annexes. Volume II: Effects. Annex G. Biological effects at low radiation doses. United Nations. New York, 2000, pp. 75–161.
3. Zaichkina S.I., Rozanova O.M., Aptikaeva G.F. et al., Low doses of gamma-radiation induce nonlinear dose responses in mammalian and plant cells, *Nonlinearity in biology, toxicology, medicine*, 2004, Vol. 2. (3), pp. 213–221.
4. Il'in L.A., Rozhdestvenskij L.M., Koterov A.N., Borisov N.M., *Aktual'naja radiobiologiya* (Current radiobiology), Moscow, 2015. 240 p.
5. Jan S., Parween T., Siddiqi T.O., Mahmooduzzafar, Effect of gamma radiation on morphological, biochemical, and physiological aspects of plants and plant product, *Environ. Rev.* 2012, Vol. 20, pp. 17–39.
6. Gudkov S.V., Grinberg, M.A., Sukhov V., Vodeneev V., Effect of ionizing radiation on physiological and molecular processes in plants, *Journal of Environmental Radioactivity*, 2019, Vol. 202, pp. 8–24.
7. George J.T., Patel, B.B., Rane V.A. et al., Non-linear dose response of a few plant taxa to acute gamma radiation, *Cytologia*, 2014, Vol. 79 (1), pp. 103–109.
8. Vakulovsky S.M., Kryshev I.I., Nikitin A.I., Savitsky Y.V., Malyshev S.U., Tertyshnik E.G., Radioactive contamination of the Yenisei River, *Journal of Environmental Radioactivity*, 1995, Vol. 29, pp. 225–236.
9. Bolsunovsky A., Artificial radionuclides in sediment of the Yenisei River, *Chemistry and Ecology*, 2010, Vol. 26 (6), pp. 401–409.
10. Sukhorukov F.V., Degermendzhi A.G., Belolipetskii V.M et al., *Zakonomernosti raspredeleniya i migratsii radionuklidov v doline reki Enisei* (Patterns of distribution and migration of radionuclides in the Yenisei River valley), Novosibirsk: Izd-vo SO RAN. Filial «Geo», 2004, 286 p.
11. Bolsunovsky A., Dement'ev D., Trofimova E., Biomonitoring of radioactive contamination of the Yenisei River using aquatic plants, *Journal of Environmental Radioactivity*, 2020, Vol. 211, Art. No. 106100.
12. Zotina T.A., Trofimova E.A., Medvedeva M.Yu., Dement'ev D.V., Bolsunovsky A.Ya., Use of the aquatic plant *Elodea canadensis* to assess toxicity and genotoxicity of Yenisei River sediments, *Environmental Toxicology and Chemistry*, 2015, Vol. 34, pp. 2310–2321.
13. Bolsunovsky A.Y., Dement'ev D.V., Trofimova E.A. et al., Chromosomal aberrations and micronuclei induced in onion (*Allium cepa*) by gamma-radiation, *Journal of environmental radioactivity*, 2019, Vol. 207, pp. 1–6.
14. Trofimova E.A., Dement'ev D.V., Bolsunovsky A.Ya., *Radiation biology. Radioecology*, 2019, Vol. 59 (3), pp. 293–299. (in Russ.)
15. Zueva A.V., Trofimova E.A., Dement'ev D.V., Bolsunovskii A.Ya., *Radiation biology. Radioecology*, 2021, Vol. (2), pp. 180–188. (in Russ.)
16. Grant W.F., Owens E.T., Chromosome aberration assays in *Pisum* for the study of environmental mutagens, *Mutation Research*, 2001, Vol. 488, pp. 93–118.
17. Zaka R., Chenal C., Misset M.T., Study of external low irradiation dose effects on induction of chromosome aberrations in *Pisum sativum* root tip meristem, *Mutation Research*, 2002, Vol. 517 (1–2), pp. 87–99.
18. Kravets E.A., Mykheyev A.N., Ovsyannikova L.G., Grodzynsky D.M., *Cytology and genetics*, 2011, No. 1, pp. 24–34 (in Russ.).
19. Oreshnikova O.P., Kozhukhova E.V., *Vestnik NGAU*, 2021, No. 2 (59), pp. 53–61.
20. Kozhukhova E.V., Oreshnikova O.P., *Vestnik NGAU*, 2022, No.1 (62), pp. 37–45.